

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka

*Susanna Honkala*

# **RAKENNUKSEN ENERGIAJÄRJESTELMIEN SIMULOIN- TIPOHJAINEN MITOITUSMENETELMÄ**

Työn tarkastajat: Dosentti Ahti Jaatinen-Värri  
DI Joni Hilpinen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Susanna Honkala

**Rakennuksen energiajärjestelmien simulointipohjainen mitoitusmenetelmä**

Diplomityö 2021

Tarkastaja: Dosentti Ahti Jaatinen-Värri

Toinen tarkastaja: DI Joni Hilpinen, Sweco Talotekniikka Oy

66 sivua, 6 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: energiatehokkuus, energiasimulointi, energiajärjestelmä

Energiatehokkuus- ja taloudellisuus ovat yksi tämän päivän suurimpia puheenaiheita sekä olennaisia perusteita kestäväen kehityksen mukaiselle rakentamiselle. Globaali energiamurros asettaa myös rakennuksien energiajärjestelmät keskiöön, ja tulevaisuuden energiajärjestelmien mitoituksessa väistämättä nousee esiin resurssien mahdollisimman tehokas hyödyntäminen.

Edistyksellisessä energiajärjestelmien tehomitoituksessa olennaiseen rooliin asettuu dynaamiset energiasimuloinnit, jotka mahdollistavat muun muassa useiden muuttujien, älykkäiden energiajärjestelmien sekä käyttäjien toiminnan vaikutuksen huomioimisen. Rakennuksien energiajärjestelmien tehomitoitus vaikuttaa pitkälle tulevaisuuteen rakennuksien ollessa pitkäikäisiä energiankäyttäjiä. Näin ollen on perusteltua kiinnittää huomiota energiajärjestelmien optimaaliseen tehomitoitukseen. Tämän diplomityön tavoitteena on löytää ja tarkastella energiasimulointien näkökulmasta relevantteja parametreja, jotka vaikuttavat rakennuksien simulointipohjaiseen energiajärjestelmien mitoitukseseen. Energiajärjestelmien

simuloinneissa vaikuttavien parametrien vaikutuksia mitoitustehoihin tutkitaan kolmen todellisen simulointikohteen avulla.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
School of Energy Systems  
Energy Technology

Susanna Honkala

### **Simulation-based sizing method for building energy systems**

Master's thesis 2021

Thesis supervisor: Docent Ahti Jaatinen-Värri

Thesis advisor: Joni Hilpinen, M. Sc. (Tech)

66 pages, 6 figures and 1 attachment

Keywords: building energy simulation, energy performance, energy system

Energy efficiency and economy are one of the biggest topics of discussion today, as well as essential criteria for building in a sustainable way. The global energy transition will also put the energy systems of buildings at the center, and the dimensioning of future energy systems will inevitably lead to the most efficient use of resources.

Dynamic energy simulations play an essential role in advanced power system power measurement, which makes it possible to take into account the impact of several variables, intelligent energy systems and the operation of users. The power dimensioning of energy systems in buildings has a far-reaching effect on the future, as buildings are long-term energy users. It is therefore justified to pay attention to the optimal power dimensioning of energy systems. The aim of this Master's thesis is to find and examine the relevant parameters from the perspective of energy simulations that affect the simulation-based dimensioning of energy systems in buildings. In the simulations of energy systems, the effects of the most influential parameters on the design powers are investigated with three real simulation cases.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty rakennusliikkeelle Lehto Toimitilat Oy:lle yhteistyössä Sweco Talotekniikka Oy:n kanssa. Työn valvojana toimi dosentti Ahti Jaatinen-Värri Lappeenranta-Lahden teknilliseltä yliopistolta. Haluan kiittää Ahtia työn ohjaamisesta sekä tarkastamisesta.

Iso kiitos työn aikaisesta tuesta kuuluu työn ohjaajalleni Joni Hilpiselle, joka omistautuneesti ja kärsivällisesti on jaksanut opastaa koko prosessin ajan omista kiireistä sekä hektisistä aikatauluista huolimatta. Kiitokset kuuluvat myös esimiehilleni Swecolla, jotka ovat mahdollistaneet joustavasti työn, opintojen ja vapaa-ajan yhteensovittamisen sekä Lehto Toimitilat Oy:lle ja Ari Savolaiselle mahdollistamisesta mielenkiintoiseen diplomityöaiheeseen.

Jyväskylässä 25.04.2021

*Susanna Honkala*

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## SISÄLLYSLUETTELO

## SYMBOLILUETTELO

## KÄSITELUETTELO

1	JOHDANTO .....	7
2	TEORIA .....	9
2.1	Tutkimuksen taustaa ja tutkimusongelman rajaus .....	9
2.2	Rakennusmääräykset ja asetukset .....	11
2.2.1	Lämpöhäviöt ja tasauslaskenta .....	11
2.2.2	E-luku .....	13
2.2.3	Ilmanvaihto ja sisäilmasto .....	15
2.3	Sisäilmastoluokitus .....	16
2.4	Perinteinen energiajärjestelmien mitoitus .....	18
2.4.1	Lämmitys .....	18
2.4.2	Jäähdytys .....	21
2.4.3	Lämmöntuottolaitokset .....	23
2.5	Rakennusten energiasimulointi .....	25
2.5.1	Simuloinnin laskentaparametrit .....	26
2.5.2	Simulointimallien luotettavuus .....	27
3	MENETELMÄN KEHITTÄMINEN .....	28
3.1	Tutkittavat rakennukset .....	29
3.1.1	Case 1, liikerakennus .....	29
3.1.2	Case 2, opetuskiinteistö .....	30
3.1.3	Case 3, hybridikiinteistö .....	32
3.2	Energiajärjestelmien mitoitus .....	34
3.2.1	Säädata .....	35
3.2.2	Rakennuksen käyttöprofiilien arviointi .....	38
3.2.3	Tilalämmitys- ja jäähdytys .....	40
3.2.4	Ilmanvaihto .....	40
4	SIMULOINTITULOKSET .....	41
4.1	Lämmitysteho .....	41
4.1.1	Henkilötiheyden vaikutus lämmitystehontarpeeseen .....	48
4.1.2	Palautusilmakoneiden lämmitystehontarve .....	49
4.1.3	Ilmamääräsäätö (IMS) .....	51
4.2	Jäähdytysteho .....	53

5	TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI .....	58
5.1	Simuloinnin kannalta olennaiset laskentaparametrit .....	58
5.2	Tutkimustulosten luetettavuus .....	59
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	60
	LÄHTEET .....	63

## LIITTEET

Liite 1. Sisäilmastoluokituksen mukaiset lämpötilojen tavoitearvot

## SYMBOLILUETTELO

### Roomalaiset

$\varphi$	lämmitysteho	[W]
$\eta$	hyötysuhde	[%]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti	[1000 Ws/(kgK)]
$q$	vesi-/ilmavirta	[l/s, m <sup>3</sup> /s]
$T$	lämpötila	[°C, K]

### Alaindeksit

i	ilma
iv	ilmanvaihto
s	sisäilma
sp	sisäänpuhalluslämpötila
u	ulkoilman lämpötila
u, mit	mitoitettava ulkoilman lämpötila
p	poistoilman lämpötila
lkv	lämmin käyttövesi
joht	johtumislämpö
v	vesi

### Lyhenteet

AHSRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building Information Model
CAV	Constant Air Volume
E-luku	Laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku
EED	Energy Efficiency Directive



EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
U-arvo	Lämmönläpäisykerroin, W/(m <sup>2</sup> K)
q50	Rakennusvaipan ilmanvuotoluku, m <sup>3</sup> /(h m <sup>2</sup> )
RES	Renewable energy directive
MET	Metabolic Equivalent
PPM	Parts Per Million
SFP	Specific Fan Power
VAV	Variable Air Volume

## KÄSITELUETTELO

Dynaaminen simulointi	Prosessia tarkastellaan simulointitilanteessa kokonaisuutena, huomioiden kaikki muuttuvat tekijät yhdenaikaisesti. Yleisesti puhuttaessa simuloinneista, tarkoitetaan tavanomaisesti dynaamista simulointia.
Energiajärjestelmä	Kokonaisuus, johon kuuluu energian tuotanto, kulutus, energianjakelujärjestelmät järjestelmä- sekä muunnoshäviöineen.
E-luku	Vuotuinen ostoenergiankulutus laskettuna lämmitettyä nettoalaa kohden, joka lasketaan rakennuksen vakioidulle käytölle sekä on painotettu energiamuotojen kertoimilla.
Perinteinen mitoitus	Lämmitysjärjestelmän tehon mitoitus staattisessa mitoitustilanteessa.

# 1 JOHDANTO

Euroopan Unioni on sitoutunut ilmasto- ja energiapakettinsa mukaisesti vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä jopa 40% verrattuna vuoteen 2030 mennessä, vertailupohjanaan vuoden 1990 kokonaispäästötaso (Euroopan parlamentti, 2018). Euroopan Unionin energiatehokkuusdirektiivi EPBD tavoite on parantaa energiatehokkuutta ja hillitä ilmastonmuutosta. Osaksi EU:n ilmasto- ja energiapakettia sisältyy energiatehokkuusdirektiivi EED, jonka keskeisiä tavoitteita on parantaa uusien ja olemassa olevien rakennuksien energiatehokkuutta luoden vähähiilistä rakennuskantaa. Direktiivin mukaisesti energiatehokkuuden parannustoimenpiteissä tulisi huomioida paikalliset sääolosuhteet, sisäilmasto-olosuhteet, sekä kustannustehokkuus. Yksi keskeisistä säännöksistä direktiivissä on energiatehokkuuden laskentamenetelmien yhtenäistäminen. Euroopan Unionin direktiivit ohjaavat Suomessa Ympäristöministeriön energiatehokkuuden rakentamismääräyskokoelmaa. Konkreettisesti rakentamista ohjataan ministeriön asettamien energiatehokkuuden vähimmäisvaatimuksin, ja näiden täytyminen rakennettavissa uudis- sekä saneerauskohteissa on osoitettava laskelmin. (Ciucci 2020, 3.)

Energiatehokkuus voidaan luokitella yhdeksi laadukkaan rakentamisen kriteeriksi, vaikkei se itsessään ole vaadittava ominaisuus. Rakennuksien tulee energiatehokkuuden lisäksi olla muun muassa viihtyisiä, turvallisia, sisäilmastoltaan hyviä sekä tilajärjestelyineen toimivia. Parantamalla energiatehokkuutta voidaan mahdollistaa pienemmät elinkaari- ja investointikustannukset, vähentää rakennusten ympäristövaikutusta sekä tukea energiaomavaraisuutta uusiutuvan energian turvin. Lisäksi energiatehokkuus voi myös parantaa asumisolosuhteita sekä hillitä energiankäytön kustannuksia energian hinnan noustessa. (Vinha et al. 2019, 3.)

Rakennusten energiakulutuksen osuus on kokonaisuudessaan Suomessa mittava, kattaen 40% loppuenergiankäytöstä sekä tuottaen kolmanneksen maamme kasvihuonepäästöistä. Energiatehokkuuden parantaminen vähentää päästöjä sekä energiajärjestelmien huipputehon tarvetta. Globaalissa mittakaavassa 38% energiasta kulutetaan asuin- ja liikerakennuksissa. (Motiva, 2020.) Energiamurroksen kynnyksellä rakennuksien energiatehokkuus on ajankohdainen rakennuksen suunnitteluvaiheesta loppukäyttöön saakka. Suunnittelussa energiajärjestelmien tehon optimointi on kasvamassa suurempaan rooliin, jolloin on mahdollisuus

välttää järjestelmien systemaattista ylimitoitusta. Keskeisiä energiankulutuksen kohteita rakennuksissa ovat tilalämmitys- ja jäähdytys, ilmanvaihto, valaistus sekä lämmin käyttövesi. (Airaksinen & Jalas 2017, 2.)

Perinteisesti energiatehokkaan rakentamisen painopiste on kohdentunut rakenteelliseen energiatehokkuuteen, ja verrattuna muihin maihin, on Suomen uudisrakennuksien vaipan lämmöneristävyys erinomaisella tasolla (Airaksinen & Jalas 2017, 2). Taloteknisien järjestelmien investointikustannukset uudisrakennuksessa ovat murto-osa koko investoinnin kustannuksista. Kiinteistöjen älykkäät ohjausjärjestelmät yleistyvät, ja tämän vuoksi myös talotekniikan kustannuksien osuus on ollut noususuhdanteinen. Teknologian ja automatiikan avulla kuitenkin voidaan ohjata rakennuksien energiankulutusta entistä optimaalisemmin. Usein rakennuksen investointikustannuksilla on suuri painoarvo verrattuna koko käyttöajan kustannuksiin. Suunnitteluratkaisuissa olisi optimaalista tehdä kustannustehokkaita ratkaisuja koko elinkaari huomioon ottaen, sillä investointikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto ei välttämättä ole edullisin koko rakennuksen tai laitteiston elinkaari huomioiden. Huomatavia elinkaarivaikutuksia sisältäviä hankintoja ovat taloteknisiin järjestelmiin ja rakennuksen vaipparakenteisiin. Huomioiden koko elinkaaren käyttökustannukset sekä energiansäästöpotentiaali, on hyvin perusteltua kiinnittää huomiota resurssitehokkaaseen energiatehon mitoittamiseen. (Heimonen et al. 2009, 14.)

Energiatehokkaiden laite- ja materiaaliratkaisujen lisäksi rakennuksen käyttäjillä on olennainen merkitys rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen näkökulmasta. Verrattaessa teknologiselta ja rakennuksen energiatehokkuuden näkökulmasta samantasoisia rakennuksia on havaittu jopa kolminkertaista energiankulutusta riippuen käyttäjistä. Lisäksi tarpeenmukaisen lämmityksen, jäähdytyksen sekä ilmanvaihdon säädön on havaittu parantavan rakennuksen energiantehokkuutta 10-30%. Käyttäjien motivoinnilla ja informaation lisäämisellä energiatehokkuussäästötoimenpiteiden konkreettisista vaikutuksista on havaittu hyviä tuloksia yksittäisissä seurantatutkimuksissa. (Airaksinen & Jalas 2017, 3.)

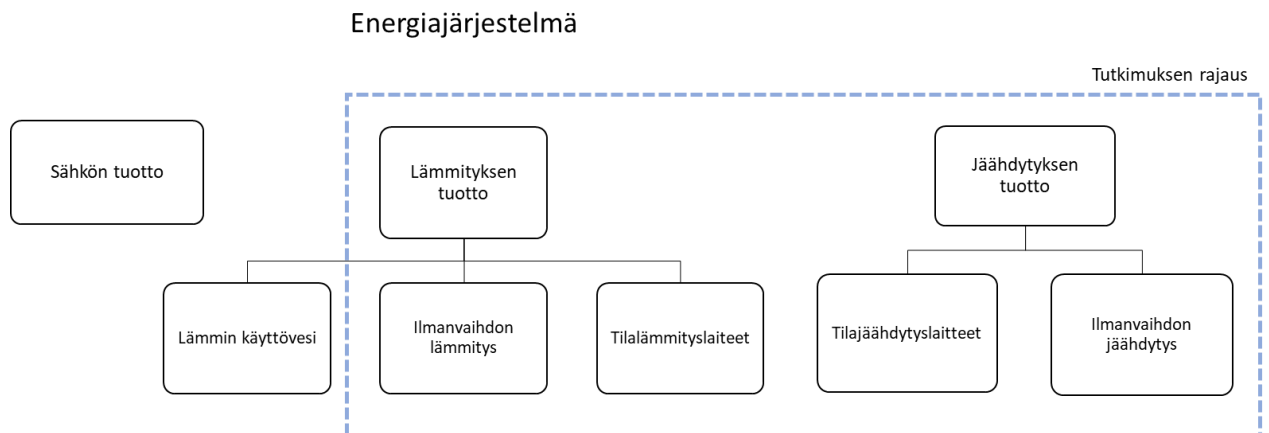
## 2 TEORIA

### 2.1 Tutkimuksen taustaa ja tutkimusongelman rajaus

Tavanomaisesti rakennuksien energiajärjestelmien tehomitoitus tehdään taloteknisien järjestelmien maksimitehomoituksen pohjalta. Lämmitysjärjestelmät mitoitetaan staattiseen mitoittavaan ulkolämpötilaan, vaikka realistisesti pakkasjaksoja mitoittavassa ulkolämpötilassa harvoin jatkuu niin pitkään, että voidaan olettaa ulkolämpötilan pysyvän staattisessa tilassa. Lämmitysjärjestelmien mitoituksessa ei huomioida lämpökuormia, muuttuvia sääolosuhteita tai rakennuksen realistista käyttöä valaistuksineen, laitteineen ja ihmismäärineen. Todellisuudessa vaadittava lämmitysteho voi mahdollisesti olla rakennuksen kokonaislämmitystehtoon nähden huomattavasti vähemmän, kuin mitä suunnitelmien perinteinen mitoitusteho on. Toisaalta myös ihmiset ja esimerkiksi tilojen epäpuhtauskuormat voivat lisätä energiajärjestelmien tehontarvetta, mikäli optimaaliset sisäilmasto-olosuhteet halutaan taata.

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia simulointipohjaista mitoitusta ja analysoida erilaisia parametreja, jotka vaikuttavat lämmitys- sekä jäähdytystehomitoitukseen verrattuna niin kutsuttuun perinteiseen energiajärjestelmien mitoitukseen. Tutkimuksen avulla pyritään saavuttamaan informaatiota olennaisista seikoista, joihin on perusteltua kiinnittää enemmän huomiota, mutta myös tietoa parametreista, joilla ei ole energiajärjestelmien simulointipohjaisen tehomitoituksen osalta merkitystä.

Kuvassa 1. on esitetty energiajärjestelmien osa-alue, johon tässä diplomityössä keskitytään. Kehitettävässä mitoitusmenetelmässä hyödynnetään perinteistä mitoitusta lämpimän käyttöveden osalta. Simulointipohjaisen energiajärjestelmien tehomitoituksen tavoitteena on arvioida rakennuksen mitoitustehoa, sillä tähän asti simulointityökaluja on käytetty lähinnä koko rakennuksen energiankulutuksen sekä yksittäisien tilojen mitoitustehon simulointeihin. Diplomityössä tutkitaan mitoitustehon kannalta oleellisia muuttujia, joita ei mahdollisesti huomioida rakennuksen tavoite-energiankulutuslaskelmassa vastaavalla tarkkuustasolla. Mitoitusmenetelmän tavoitteena on poistaa turhia varmuuksia koko energiajärjestelmän tehomitoituksen näkökulmasta, jolloin menetelmää ei sovelleta esimerkiksi yksittäisien tilalaitteiden, kuten esimerkiksi lämmityspattereiden mitoitukseen.



**Kuva 1.** Tutkimuksen rajaus

Lämmityksen sekä jäähdytyksen tehomitoitusta suunniteltaessa perinteisesti komponentit mitoitetaan suurimmalle mahdolliselle tehontarpeelle, vaikka todellisuudessa on melko epärealistista olettaa ilmanvaihdon ja tilalämmityksen -tai jäähdytyksen vaativan huipputehon samalla hetkellä. Taloteknisien järjestelmien tarpeeton ylimitoitus vaikuttaa epäsuotuisasti resurssitehokkuuteen, investointi- ja elinkaarikustannuksiin sekä laitteistojen hyötysuhteisiin.

Jäähdytysjärjestelmän mitoituksessa vaadittavaan jäähdytystehoon vaikuttaa simulointi- tai laskentatapa, eikä mitoitukseen ole välttämättä yhtä ainoaa tapaa toteuttaa. Mitoitukseen vaikuttaa oleellisesti rakennuksen ominaisuuksien lisäksi tavoiteltavat sisäilmasto-olosuhteet sekä mitoitettava ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus. On esimerkiksi tehomitoituksen kannalta merkityksellistä, millaisiin sisään puhallettavan ulkoilman kosteus- ja lämpötilaoloihin järjestelmä mitoitetaan.

Haasteena simulointipohjaiselle lämmitystehojen mitoitukselle on ollut realistisen dynaamisen säädäntäpuuttuminen. Tämän vuoksi tämän diplomityön tutkimuksessa on käytetty pohjana Ilmatieteenlaitoksen dynaamista säädäntä, johon on lisätty muutama päivä ulkoilman mitoitettavalla lämpötilalla rakennuksen sijainnin säävyöhykkeen mukaisesti. Tähän säädäntäpuuttamiseen on reagoitu myös Ilmatieteenlaitoksella, ja tänä vuonna sellainen on oletettavasti tulossa.

## 2.2 Rakennusmääräykset ja asetukset

Suomen rakentamismääräyskokoelma määrittelee yleiset edellytykset ja vähimmäisvaatimukset, jotka ohjaavat rakennuksien suunnittelua sekä toteutusta. Rakennuksen energiatehokkuudelle löytyy määräyksistä oma lukunsa. Ympäristöministeriön asetusten taustalla ovat Euroopan Unionin rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPDB, uusiutuvan energian käytön edistämisdirektiivi RES sekä energiatehokkuusdirektiivi EED, jotka ohjaavat osaltaan kansallista lainsäädäntöä. Rakennuksen energiatehokkuuden vähimmäisvaatimusten toteutuminen on osoitettava asianmukaisin laskelmin. (Reinikainen et al. 2015, 9.)

Lämmityksen sekä jäähdytyksen tuotantojärjestelmien mitoittamiseen ei oteta painokkaasti kantaa määräyksien nojalla. Edellytyksenä on, että rakennuksen energiatehokkuusvaatimukset sekä vaadittavat sisäilmasto-olosuhteet täyttyvät, mutta energiajärjestelmien mitoituksessa on mahdollisuus mitoittaa järjestelmä lasketusta lämmitystehontarpeesta poikkeavasti.

Ympäristöministeriön linjaus tulevaisuudessa on ohjata rakentamista yhä päästöttömämpään suuntaan ja kiinnittää niihin entistä suurempi huomio. Ympäristöministeriön julkisen vähähiilisen rakentamisen tiekartan mukaisesti rakennuksen elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä tullaan rajoittamaan säädöksin vuoteen 2025 mennessä. Avainasemassa kohti päästötöntä rakentamista on energiatehokas, elinkaarikustannukset huomioon ottava energiajärjestelmien mitoitus. Energian kulutuksen näkökulmasta toteutetut ratkaisut on oltava määrättyjen hiilijalanjäljen raja-arvoissa. (Ympäristöministeriö 2019, 5.)

### 2.2.1 Lämpöhäviöt ja tasauslaskenta

Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisesti rakennuksen lämpöhäviö voi olla enintään yhtä suuri kuin vertailuarvoilla rakennukselle määritelty vertailulämpöhäviö. Rakennuksen lämpöhäviövaatimusten avulla voidaan varmistaa, että pitkäikäiset ja toisaalta vaikeasti korjattavat ratkaisut, kuten vaipparakenteet, ovat energiatehokkaita huolimatta muista energiajärjestelmistä tai lämmitysenergiamuodosta. Lämpöhäviövaatimukset toimivat vähimmäisvaatimuksina energiatehokkuuden vertailuluvun, eli E-luvun rinnalla. Rakennusvaipan lämpöhäviöt on määräyksissä esitetty U-arvon avulla. (Tasauslaskentaopas 2018, 24.)

$$\begin{aligned} \sum H_{joht} = & \sum U_{ulkoseinä} \cdot \sum A_{ulkoseinä} + \sum U_{yläpohja} \cdot \sum A_{yläpohja} + \\ & \sum U_{alapohja} \cdot \sum A_{alapohja} + \sum U_{ikkuna} \cdot \sum A_{ikkuna} + \sum U_{ovi} \cdot \sum A_{ovi} \end{aligned} \quad (1)$$

jossa  $\sum H_{joht}$  on rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö [W/K],  $U$  on rakennusosan lämmönläpäisykerroin [W/(m<sup>2</sup>K)],  $A$  on rakennusosan pinta-ala [m<sup>2</sup>].

Rakennuksen vuotoilman lämpöhäviöt esitetään ilmavuotoluvun  $q_{50}$  avulla. Ilmavuotoluku kertoo, kuinka monta kuutiota ilmaa vuotaa yhden neliön kokoiselta alalta rakennuksen ulkovaipan lävitse tunnin aikana. Rakentamismääräyksien mukaan ilmanvuotoluku saa enimmillään olla 4.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>). Vuotoilman ominaislämpöhäviö lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$H_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} \quad (2)$$

jossa  $H_{vuotoilma}$  on vuotoilman ominaislämpöhäviö [W/K],  $\rho_i$  on ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>],  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [Ws/(kgK)],  $q_{v,vuotoilma}$  on vuotoilmavirta [m<sup>3</sup>/s].

Vuotoilmavirta lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$q_{v,vuotoilma} = (q_{50}/3600 \cdot x) A_{vaippa} \quad (3)$$

jossa  $q_{v,vuotoilma}$  on vuotoilmavirta [m<sup>3</sup>/s],  $q_{50}$  on rakennusvaipan ilmanvuotoluku [m<sup>3</sup>/(h m<sup>2</sup>)],  $A_{vaippa}$  on rakennusvaipan pinta-ala, [m<sup>2</sup>],  $x$  kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24, kolme- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille korkeimmille rakennuksille 15, 3600 on kerroin, joka ilmavirran m<sup>3</sup>/h yksiköstä m<sup>3</sup>/s yksikköön.

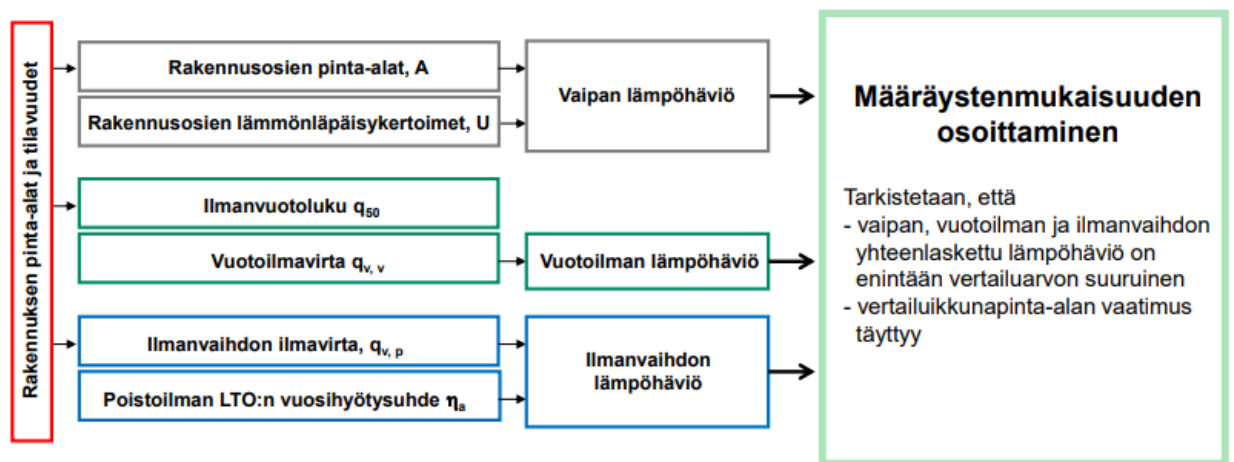
Ilmanvaihdon lämpöhäviöt lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$H_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{v, poisto} t_d (1 - \eta_a) \quad (4)$$

jossa  $H_{iv}$  on ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö [W/K],  $q_{v, poisto}$  on standardikäytönmukainen laskennallinen poistoilmavirta [m<sup>3</sup>/s],  $t_d$  on ilmanvaihtojärjestelmän keskimääräinen

vuorokautinen käyntiaikasuhde,  $t_v$  on ilmanvaihtojärjestelmän viikoittainen käyntiaikasuhde,  $\eta_a$  on ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton (LTO) vuosihyötysuhde.

Rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskennalla osoitetaan Ympäristöministeriön asettavien vaatimuksien täyttyminen, mutta se ei suoranaisesti vaikuta lämmitysjärjestelmän mitoittamiseen, eikä luo sille itsessään vaatimuksia. Lyhyesti lämpöhäviöille asetettu vaatimus läpäistään, mikäli tasauslaskelmalla osoitetaan rakennuksen vaipan, vuotoilman sekä ilmanvaihdon yhteenlasketun lämpöhäviön olevan enintään vertailuratkaisun vastainen kuten kuvassa 2. on esitetty. (Tasauslaskentaopas 2018, 11.)



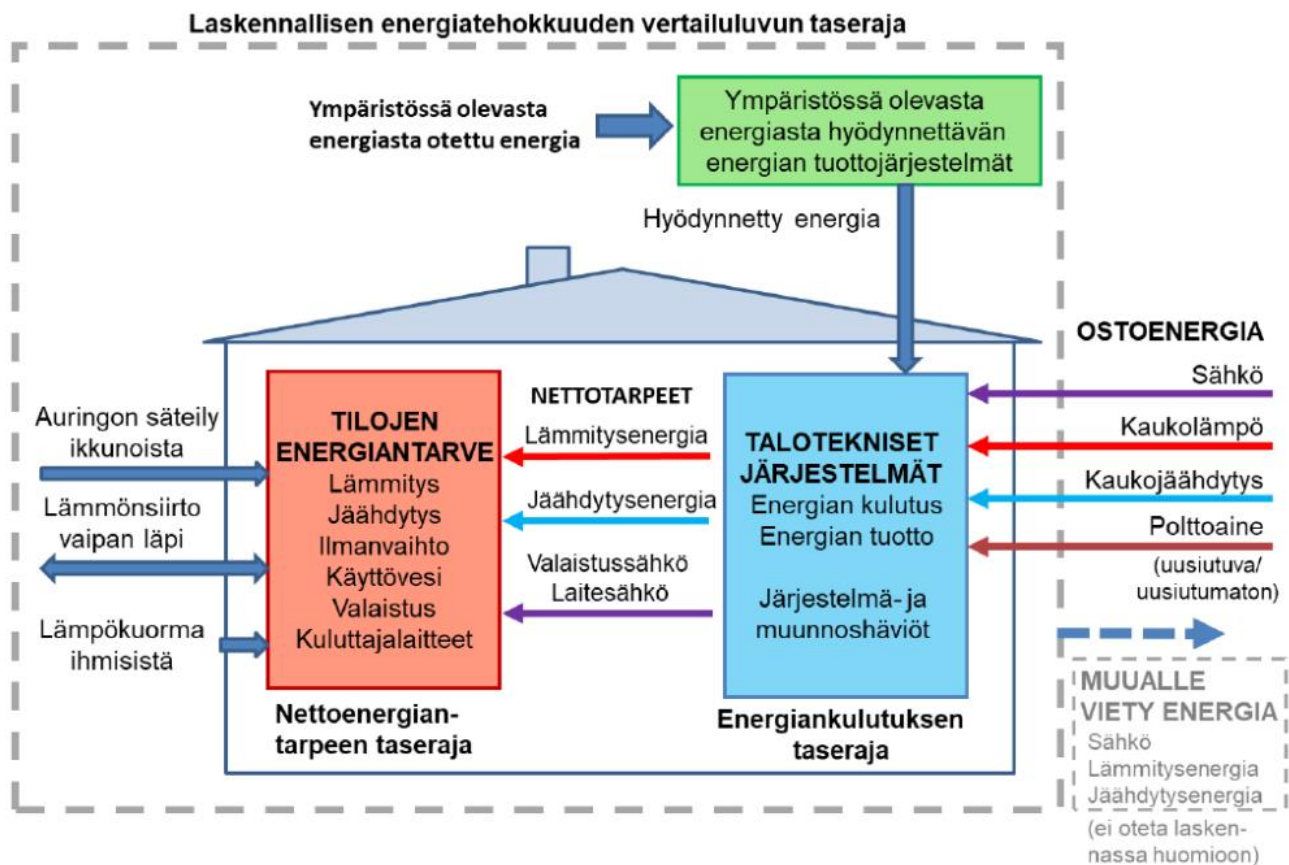
**Kuva 2.** Rakennuksen lämpöhäviöiden tasauslaskenta (Tasauslaskentaopas 2018, 11.)

### 2.2.2 E-luku

Ympäristöministeriö vastaa rakennuksien energiatodistuksiin liittyvän lainsäädännön valmistelusta, kehittämisestä sekä lain toimeenpanon seurannasta. Lainsäädännön mukaan energiatodistusta vaaditaan kaikilta rakennuksilta, joita koskevat rakentamismääräyksien vaatimukset. Uudisrakennuksissa energiatodistus tulee esittää rakennuslupahakemuksen yhteydessä. (Motiva, 2020.) Energiatodistuksessa esitetään liitteenä laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku, E-luku. Rakennuksen E-luku ( $\text{kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$ ) lasketaan jakamalla energiamuodon kertoimella painotettu rakennuksen vakioituun käyttöön perustuva laskennallinen ostoenergiankulutus rakennuksen lämmitetty nettoalaa kohden vuodessa. Rakennuksien energiamuotokertoimet on esitetty Ympäristöministeriön asetuksen 1048/2017



liitteessä 1. Rakennuksen ostoenergian kulutus määritetään vakioituun käyttöön perustuvalla energiankulutuksella. Ostoenergiankulutukseksi lasketaan hankittavaksi energia, joka hankitaan esimerkiksi fossiilisin polttoainein, kaukolämmöstä tai sähkönjakeluverkosta. Kuvassa 3. on esitelty ostoenergiankulutuksen ja energiakulutuksen taserajat. Rakennuksen energiantarve koostuu lämmitys-, ilmanvaihto-, ja jäähdytysjärjestelmien, valaistuksen sekä kuluttajalaitteiden energiankulutuksesta. E-luku laskennan tavoitteena on omalta osaltaan ohjata energiatehokkaaseen rakentamiseen hyödyntäen uusiutuvia energialähteitä. E-luvun laskennassa käytetään rakennuksen vakioituun käyttöön perustuvia lähtötietoja, joita voidaan harkinnan varaisesti hyödyntää myös energiasimulointimalleissa. Näitä ovat esimerkiksi valaistuksen, ihmisten sekä laitteiden sisäiset lämpökuormat ja ilmanvaihdon aikataulut. (Ympäristöministeriö 2017b, 6.)



**Kuva 3.** Ostoenergiakulutuksen taseraja, Ympäristöministeriö 2017a, 15.)

Sisäilmastoluokituksen lisäksi myös Ympäristöministeriön asetus 1010/2017 määrittelee alla olevan taulukon 1. mukaisesti rakennustyypeittäin rakennuksen vakioitua käyttöä sekä

sisäisiä laitekuormia. Asetuksen mukaisia arvoja käytetään rakennuksen energialukulaskennassa sekä voidaan hyödyntää energiasimulointimallien lähtöarvoissa.

**Taulukko 1.** Rakennuksen vakioitu käyttö (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017, 11 §).

Rakennus/tila		Käyttö-aika		Käyttöaste	Valaistus	Laitteet	Ihmiset (1,4)
	Kellonaika	h/vrk	vrk/vko	-	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
<b>Luokka 1)</b>	00.00-24.00	24	7	0,6, valaistus 0,1	6	3	2
<b>Luokka 2)</b>	00.00-24.00	24	7	0,6, valaistus 0,1	9	4	3
<b>Luokka 3)</b>	07.00-18.00	11	5	0,65	10	12	5
<b>Luokka 4)</b>	08.00-21.00	13	6	1	19	1	2
<b>Luokka 5)</b>	08.00-16.00	24	7	0,3	11	4	4
<b>Luokka 6)</b>	08.00-16.00	8	5	0,6	14	8	14
<b>Luokka 7)</b>	08.00-22.00	14	7	0,5	10	0	5
<b>Luokka 8)</b>	00.00-24.00	24	7	0,6	7	9	8

### 2.2.3 Ilmanvaihto ja sisäilmasto

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta mukaan ilmanvaihto ja sisäilmasto-olosuhteet on suunniteltava huomioiden terveellinen, viihtyisä ja turvallinen sisäilman laatu. Asetus määrittää, että oleskelutiloihin on tuotava ulkoilmaa 6 dm<sup>3</sup>/s henkilöä kohden, ja koko rakennuksen ulkoilmavirraksi on mitoitettava vähintään 0,35 dm<sup>3</sup>/s, mikäli rakennuksen käyttötarkoituksen erityisluonteen takia ei aiheudu lisäilmavirran vaadetta. Ilmanvaihdon suunnittelussa on huomioitava viihtyisä sisäilmasto, energiatehokkuus ja suunnittelukohteen mahdolliset erityisvaatimukset. (Ympäristöministeriön asetus 1009/2017, 9 §.)

Ympäristöministeriön asetusta 1009/2017 uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta tukevaa opasta ilmanvaihdon mitoittamiseen muissa kuin asuinrakennuksissa on määriteltäviä mitoitusilanteita, joissa mahdollisesti vaaditaan suurempia ilmamääriä kuin asetuksen mukaan on välttämätöntä. Esimerkiksi hiilidioksidin tuottoon perustuva ilmanvaihdon mitoituksessa on oppaan mukaan huomioitava henkilöiden lukumäärä, aineenvaihdunnan teho

sekä oleskeluajan pituus ja tilan tilavuus. Ihmisen hiilidioksidin tuotto muuttuu suoraan verrannollisena aineenvaihdunnan tehoon. Liike- ja myymälätilojen ilmanvaihdossa on huomioitava myös epäpuhtaus- ja hajukuormitus, myymälän koko sekä asiakasmäärä. Ulkoilmavirta on mitoitettava epäpuhtauslähteiden määrän ja voimakkuuden mukaisesti. (FINVAC ry 2017, 4.)

### 2.3 Sisäilmastoluokitus

Viimeisin sisäilmastoluokitus 2018 toimii sekä suunnittelun että urakoinnin apuvälineenä, kun tavoitteena on rakentaa tai korjata terveitä ja sisäilmasto-olosuhteiltaan viihtyisiä rakennuksia. Miellyttävän sisäilmaston kannalta olennaisia tekijöitä ovat lämmitys, ilmanvaihto, rakennustekniikka, käytetyt materiaalit sekä rakennuksen käytön että kunnossapidon huomiointi. Sisäilmastoluokitus täydentää osaltaan rakentamismääräyksiä, rakennustöiden yleisiä vaatimuksia sekä RT-sekä LVI-ohjekortteja. (Sisäilmastoluokitus 2018, 1).

Sisäilmastoluokitus sisältää sisäilmaston tavoite- ja suunnitteluarvot. Sisäilmaston tavoitearvot ovat se määrittävät pitkälle mihin tasoon rakennuksen järjestelmät tulee mitoittaa. Luokitus pitää sisällään kolmitasoisen laatuluokituksen; yksilöllisen S1 sisäilmaston, hyvän sisäilmaston S2 sekä tyydyttävän sisäilmaston S3. Sisäilmastoluokituksissa määritellään myös operatiivisen lämpötilan tavoitearvot eri sisäilmastoluokissa. S1 luokassa vaaditaan lämpötilaolosuhteilta enemmän, sillä lämpötilan tulee pysyä 90% käyttöajasta tavoitearvoissaan, jotka ovat S2 luokitusta vaativammat. Sisäilmastoluokituksen tavoitteet, vaatimukset sekä ohjeistukset otetaan huomioon rakennushankkeen jokaisessa vaiheessa suunnittelusta toteutukseen. Yleisesti ottaen rakentamiselta edellytetään nykypäivänä S2-luokan sisäilmastoa. Puhtaudelle ja kosteusolosuhteille S1 ja S2-luokissa ei ole merkittäviä eroavaisuuksia, mutta S1-luokassa kriteerit lämpötilaolosuhteiden hallinnalle ovat korkeammat. (Sisäilmastoluokitus 2018, 10).

Sisäilmastoluokitus antaa ilmamäärien mitoitukseen mitoitusravot. Rakennuksen suunnittelussa on mahdollista muuntojoustavuuden tai sisäilmasto-olosuhteiden hallinnan kasvattavan ilmamääriä. Normaalin käyttöajan ulkopuolella rakennuksessa minimi-ilmanvaihdon tulee olla  $0,15 \dots 0,2 \text{ dm}^3 / \text{s}, \text{ m}^2$ . Alla olevan taulukon 2. käyttöaikoja, käyttöastetta sekä

lämpökuormia (valaistus, laitteet sekä ihmiset) voidaan käyttää lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän mitoituksessa energiankulutuksen laskennassa sekä lämpöolosuhteiden sekä pituusien simuloinneissa. Energiasimuloinneissa voidaan hyödyntää sisäilmastoluokituksen tai vaihtoehtoisesti E-luvun laskentaan käytettäviä vakioituja sisäisiä lämpökuormia sekä käyttöaikoja. Suunnittelussa pyritään ensisijaisesti käyttämään todellisia käyttöasteita, henkilötiheyksiä sekä lämpökuormia. Mikäli niitä ei ole saatavilla, voidaan käyttöprofiileja sekä sisäisiä lämpökuormia arvioida alla olevan taulukon mukaisesti. Liitteessä 1. on esitetty sisäilmastoluokituksen mukaiset lämpötilojen tavoitearvot, joita noudatetaan diplomityön tutkimuskohteiden dynaamisissa energiasimuloinneissa.

**Taulukko 2.** Tilojen käyttöprofiilit sekä sisäiset lämpökuormat (Sisäilmastoluokitus 2018, 14).

Rakennus/tila	Kellonaika	Käyttöaika h/vrk	vrk/vko	Henkilötiheys m <sup>2</sup> /hlö	Käyttöaste	Valaistus W/m <sup>2</sup>	Laitteet W/m <sup>2</sup>	Ihmiset (1,4) W/m <sup>2</sup>
<b>Asuintilat (pientalo)</b>	00.00-24.00	24	7	37	0,6	8	2,4 3)	2
<b>Asuintilat (kerrostalo)</b>	00.00-24.00	24	7	25	0,6	6	3	3
<b>Toimistotilat</b>	07.00-18.00	11	5	12	0,55	12	15	6
<b>Neuvottelutilat</b>	08.00-17.00	9	5	3	0,6	12	18...60	25
<b>Opetustilat</b>	08.00-16.00	8	5	2	0,5	18	12	35
<b>Päiväkodin ryhmätilat</b>	07.00-18.00	11	5	2	0,4	18	12	35
<b>Liiketilat</b>	07.00-21.00	14	7	17	0,55	15...70	8	5
<b>Hotellihuone</b>	00.00-24.00	24	7	19	0,5	14	7	4
<b>Ravintolatilat</b>	10.00-22.00	12	7	3	0,4	20	20	26
<b>Urheilutilat</b>	07.00-23.00	16	7	21	0,6	20	24	5
<b>Terveydenhoitotilat</b>	00.00-24.00	24	7	8	0,8	9	3	10

1) ei sisällä latenttia lämpöä, kokonaislämmönluovutus saadaan jakamalla kertoimella 0,6

2) asuinrakennusten valaistuksen käyttöaste on 0,1

3) asuinrakennusten laitteiden sähkönkäyttö lasketaan jakamalla lämmönluovutus kertoimella 0,7

4) Simulointiohjelmissa käytetään henkilön lämmönluovutuksena 125 W (1,2 met, kehon pinta-ala 1,8 m<sup>2</sup>).

Kouluissa ja päiväkodeissa käytetään lasten lämmönluovutuksena 110 W (1,0 met, kehon pinta-ala 1,8 m<sup>2</sup>).

## 2.4 Perinteinen energiajärjestelmien mitoitus

### 2.4.1 Lämmitys

Perinteisesti lämmitysjärjestelmät mitoitetaan Ympäristöministeriön 1010/2017 asetuksen mukaisesti säävyöhykkeiden mitoittavan ulkolämpötilan mukaan, olettaen lämpötilojen pysyvän staattisessa tilassa. Rakennuksen lämmitystehontarve lasketaan tavanomaisesti järjestelmäkohtaisesti, joka mahdollistaa tilakohtaisten lämmityslaitteiden valinnan optimoinnin. Perinteisessä energiajärjestelmien mitoituksessa esimerkiksi tilalämmitykselle, oviverhokoneille sekä ilmanvaihdolle määritellään järjestelmäkohtaisesti huipputehontarpeet ja nämä summataan huomioimatta yhdenaikaisuuksia lämmitysjärjestelmän huipputehontarpeen mitoituksessa.

Tilalämmitys kattaa johtumis- ja vuotohäviöt, sekä tuloilman ja korvausilman lämmityksen. Mikäli tilaan johdetaan lämmittämätöntä ulkoilmaa, tai ilmaa, joka on huonetilaa kylmempää, on se huomioitava tilalämmityslaitteen mitoituksessa. Kokonaistehontarve rakennuksessa saadaan laskemalla yhteen tilakohtaiset lämmitystehot, tuloilman lämmitystehontarve sekä lämpimän käyttöveden lämmityksestä johtuva tehontarve. Perinteisessä mitoituksessa ei huomioida auringon säteilylämpöä, eikä sisäisiä lämpökuormia huomioida, mikäli ne eivät ole merkittäviä ja jatkuvia. (RT RakMK-103174 2018, 27.)

Lämmitysenergian kokonaistehontarve lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\varphi_{\text{lämmitys}} = \varphi_{\text{tila}} / \eta_{\text{tilalämmitys}} + \varphi_{\text{iv}} / \eta_{\text{iv}} + \varphi_{\text{lkv}} / \eta_{\text{lkv}} \quad (5)$$

jossa  $\varphi_{\text{lämmitys}}$  on rakennuksen lämmitystehon tarve [W],  $\varphi_{\text{tila}}$  on tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\varphi_{\text{iv}}$  on ilmanvaihdon tuloilman lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\varphi_{\text{lkv}}$  on käyttöveden lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\eta_{\text{tilalämmitys}}$  on tilalämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa,  $\eta_{\text{iv}}$  on ilmanvaihdon tuloilman lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa,  $\eta_{\text{lkv}}$  on käyttöveden lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa.

Tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve lasketaan kaavalla:

$$\varphi_{tila} = \varphi_{joht} + \varphi_{vuotoilma} + \varphi_{tuloilma} + \varphi_{korvausilma} \quad (6)$$

jossa  $\varphi_{tila}$  on tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\varphi_{joht}$  on johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi,  $\varphi_{vuotoilma}$  on vuotoilman lämpenemisen lämpötehon tarve [W],  $\varphi_{tuloilma}$  on teho tuloilman lämmittämiseen tilassa [W],  $\varphi_{korvausilma}$  on teho korvausilman lämmittämiseen tilassa [W].

Ilmanvaihdon tuloilman lämpenemisen lämpötehon tarve lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\varphi_{tuloilma} = \rho_i c_{pi} q_{i, tulo} (T_s - T_{sp}) \quad (7)$$

jossa  $\varphi_{tuloilma}$  on tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpötehon tarve [W],  $\rho_i$  on ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>],  $c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [Ws/(kgK)],  $q_{i, tulo}$  on tuloilmavirta [m<sup>3</sup>/s],  $T_s$  on sisäilman lämpötila [°C],  $T_{sp}$  on sisäänpuhalluslämpötila [°C].

Koko rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän tarvitsema lämmitysteho lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\varphi_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{i, tulo} (T_{sp} - T_{lto, mit}) \quad (8)$$

jossa  $\varphi_{iv}$  on ilmavaihdon lämmityspatterin teho [W],  $T_{lto, mit}$  on lämmöntalteenoton jälkeinen tuloilman lämpötila mitoitustilanteessa, [°C].

Ilmanvaihtojärjestelmän lämmityspatterin lämmitysteho lasketaan lämmöntalteenottopatterin jälkeisen lämpötilan avulla. Lämmöntalteenoton hyötysuhde määrittää olennaisesti lämmöntalteenoton jälkeistä tuloilman lämpötilaa. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde ilmoitetaan vuositasolla koneen normaalilla käytöllä. Vuosihyötysuhteen avulla lasketaan energiankulutusta, kun taas lämpötilahyötysuhteen kautta lasketaan lämmityksen mitoitusteho. Käytännössä vuosihyötysuhde on aina matalampi verrattuna tuloilmahyötysuhteeseen. Useimmiten laitevalmistajien dokumenteissa esitetään ainoastaan tuloilmahyötysuhde standardin EN308 mukaan lämpötilassa 0 °C.

Tuloilman lämpötilahyötysuhde voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\eta = (T_{lto} - T_u) / (T_p - T_u) \quad (9)$$

jossa  $T_{lto}$  on tuloilman lämpötila lämmöntalteenoton jälkeen [°C],  $T_p$  on poistoilman lämpötila [°C],  $T_u$  on ulkoilman lämpötila [°C]

Korvausilman lämpenemisen lämpötehon tarve lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\varphi_{korvausilma} = \rho_i c_{pi} q_{vi\ korvausilma} (T_s - T_{u, mit}) \quad (10)$$

jossa  $\varphi_{korvausilma}$  on korvausilman lämpenemisen lämpötehon tarve [W],  $q_{i, korvausilma}$  on korvausilmavirta [m<sup>3</sup>/s],  $T_s$  on sisäilman lämpötila [°C],  $T_{u, mit}$  on mitoittava ulkoilman lämpötila [°C].

Rakennuksen lämmitysjärjestelmien perinteiseen mitoitukseen liitetään niin kutsuttuja varmuuskertoimia, joihin kuuluu ilmanvaihdon osalta ilmanvaihtokoneen limitykset, muuntojoustavuuteen varautuminen sekä oletus kaikkien ilmanvaihtokoneiden toimivan täydellä tehokapasiteetillaan samanaikaisesti. Limitys on ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton jälkeisen lämmityspatterin mitoittamiseen tehtävä ylimitoitus. Sen tarkoituksena on varmistaa lämmityspatterin tehon riittävyys kaikissa olosuhteissa ja käyttötilanteissa. Esimerkiksi mikäli ilmanvaihdon lämmityspatterin limitys on 10 °C, lämmityspatterin teho riittää, vaikka lämmöntalteenottolaitteelta tulisi 10°C kylmempää ilmaa. Limitykset voivat aiheuttaa huomattavan eroavaisuuden ilmanvaihtokoneen lämmitystehon simuloinnin ja koneajon mukaisen tehon välille, sillä simuloinnissa näitä limityksiä ei huomioida. Virallista ohjeistusta limityksien suuruudelle tai huomioimiselle ilmanvaihtojärjestelmän kokonaismitoitustehoa arvioidessa ei ole, vaan nämä täytyy ottaa huomioon tapauskohtaisesti.

Yksi tämän päivän kestävän kehityksen rakentamisen kulmakiviä on muuntojoustavuuden huomioiminen myös ilmanvaihdon osalta. Ilmanvaihdon osalta varautuminen muuntojoustavuuteen mahdollistaa tila- tai käyttötarkoituksen muutokset resurssitehokkaasti, ja tällöin on myös mahdollisuus vaikuttaa muuttuviin sisäilmastovaatimukseen. Muuntojoustavuus on

erityisesti ilmanvaihtoon vaikuttava asia, eikä sillä ole niin suurta painoarvoa tilalämmityksen osalta. Mahdolliset tilamuutokset eivät vaikuta merkittävästi tilalämmityksen tehomitoitukseen. Perinteiseen ilmanvaihtojärjestelmän tehomitoitukseen liittyy tyypillisesti oletus siitä, että ilmanvaihtojärjestelmä on mitoitushetkellä täysillä, eli samanaikaisesti kaikilla palvelualueilla vaaditaan suurin mahdollinen ilmamäärä. Samanaikaisesti kuitenkin tilalämmitys mitoitetaan staattiseen ulkoilman mitoituslämpötilaan oletuksella, ettei tiloissa ole lainkaan sisäisiä lämpökuormia, eli rakennus olisi käytännössä tyhjä. Tästä syntyy ristiriita, sillä rakennus samanaikaisesti on ilmanvaihdon tehomitoituksen osalta täysi, ja tilalämmityksen osalta tyhjä. Rakennuksen kokonaismitoitusteho summataan perinteisesti yhteen järjestelmittäin. Oviverhokoneiden osalta usein myös perinteisessä mitoituksessa käytetään yhdenaikaisuuskerrointa, eli arvioidaan kuinka suuri osuus oviverhokoneista, on yhdenaikaisesti käytössä.

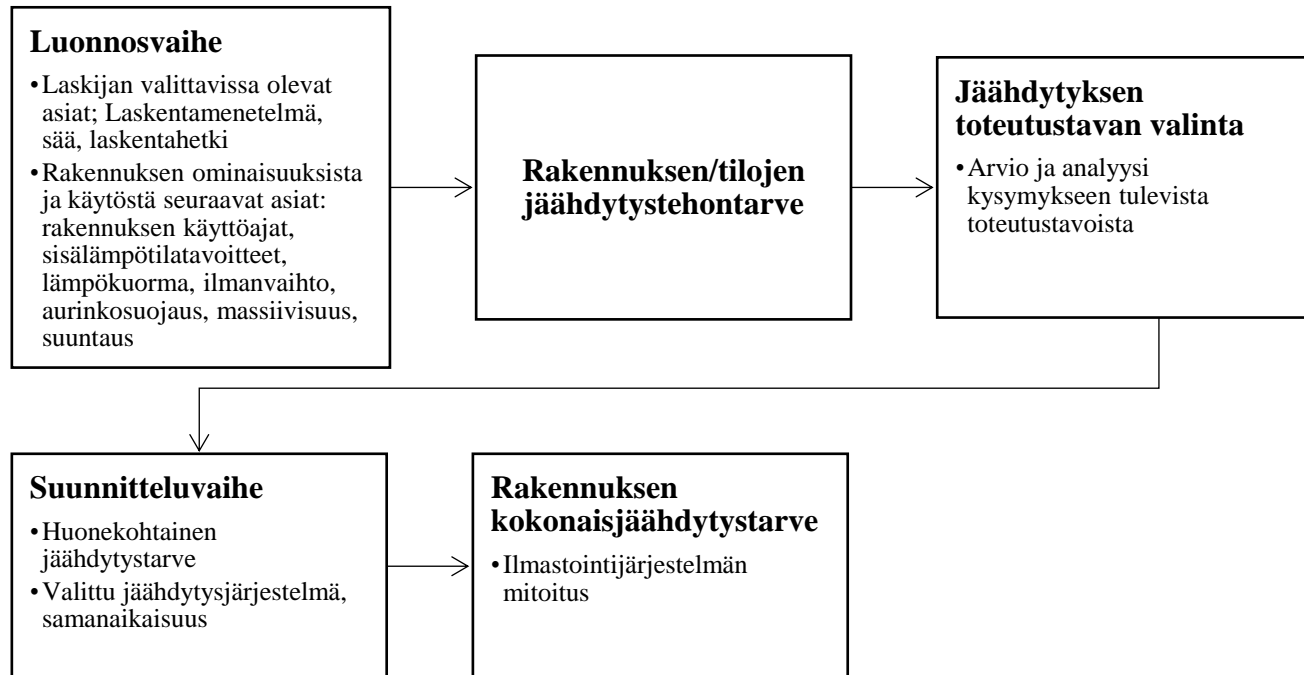
#### **2.4.2 Jäähdytys**

Kesän sisälämpötilojen hallinnalle on annettu vaatimuksia niin Ympäristöministeriön asetuksin, työsuojelun kautta sekä asumisterveysohjeiden mukaan. Vaatimukset kesäaikaisien huonelämpötilojen tarkastelulle tilojen standardikäytöllä ja säällä estävät osaltaan energiatehokkuuden parantamisen sisäolosuhteiden heikentämisen kustannuksella sekä määrittää puitteet jäähdytystehojen mitoittamiselle sekä tilalaitteiden että kokonaisten jäähdytysjärjestelmien osalta. Kesäajan huonelämpötilat on osoitettava laskennallisesti dynaamisella laskentatyökalulla, jossa huomioon otetaan rakennuksen muoto, talotekniset järjestelmät sekä sisäiset lämpökuormat. Huonelämpötilan hallintaan voidaan vaikuttaa koneellisen jäähdytyksen lisäksi rakennuksen muodolla, aurinkovarjostuksilla, ikkunoiden omaisuuksilla sekä sijoittelulla. (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017.)

Seuraavassa kuvassa 4. on esitetty jäähdytystehontarpeen laskenta vaiheittain. Suunnittelu lähtee liikkeelle rakennuksen kokonaisjäähdytystehontarpeen laskennalla, ja määritetään toteutustapa. Suunnittelun edetessä määritetään jäähdytyslaitteiston vaatimat tilavaraukset sekä huonekohtaiset jäähdytystehontarpeet. Jäähdytystehontarpeen samanaikaisuuden arvioinnilla voidaan suorittaa tarkemmin kokonaistehontarve, jäähdytysverkoston sekä laitteiston mitoitus. Kuvan 4. taulukko on esitetty vuoden 1992 LVI-kortissa, mutta jo tällöin on



otettu kantaa jäähdytysjärjestelmien tehontarpeen samanaikaisuuden huomioimiseen. Käytännössä tämä samanaikaisuuden huomioiminen on harvinaista vielä tälläkin hetkellä, jonka vuoksi samanaikaisuuden huomioiminen on yksi diplomityön tärkeimmistä tarkasteltavista seikoista. (LVI 34-10203 1992, 1.)



**Kuva 4.** Jäähdytystehontarpeen laskenta (LVI 34-10203 1992, 1).

Sisäilmastoluokituksen 2018 mukainen sisäilmastoluokka S1 ja useimmiten myös luokassa S2 vaaditaan koneellista jäähdytystä. Rakennuksen jäähdytys voidaan toteuttaa ilmanvaihdon kautta, tilalaitteilla tai hyödyntäen kumpaakin menetelmää yhdenaikaisesti. Jäähdytyksen tehontarpeen laskenta tapahtuu pääsääntöisesti simuloimalla, sillä tehoa määriteltessä on otettava huomioon useampia yhdenaikaisia muuttujia. Jäähdytyksen tehontarve koostuu ulkoisien sekä huonetiloissa syntyvien lämpökuormien vaikutuksesta. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa auringon lämpösäteily ikkunoiden ja ulkoseinien kautta sekä ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta johtuvat lämpökuormat. Jäähdytystehontarve mitoitetaan tilajäähdytyslaitteiden osalta 100% käyttöasteella. Huonelaitteiden lämpökuormat asetetaan todellisen käytön tai arvioidun tilakäytön mukaan. Sekä kesäajan lämpötilojen laskennassa että jäähdytyslaitteiden suunnittelussa käytetään standardin ISO 15927-4:2005 mukaista energialaskennan testivuotta, tai vaihtoehtoisesti Ilmatieteenlaitoksen testivuoden säätietoja.

Jäähdytysjärjestelmän sisätilojen huonelämpötilojen suunnitteluarvot sisäilmastoluokassa S1 on 24,5 °C, S2 25,5 °C ja luokassa S3 27 °C. (Sisäilmastoluokitus 2018, 10.)

Vaikka tilajäähdytyslaitteen jäähdytysteho tyypillisesti lasketaan dynaamisten simulointiohjelmien avulla, voidaan mitoitusteho laskea myös manuaalisesti seuraavalla kaavalla:

$$\dot{Q}_{kok} = \dot{Q}_{joht} + \dot{Q}_{vuoto} + \dot{Q}_{sis} + \dot{Q}_{aur} \quad (10)$$

jossa  $\dot{Q}_{kok}$  on kokonaisjäähdytystarve [W],  $\dot{Q}_{joht}$  on johtumislämpökuorma [W],  $\dot{Q}_{vuoto}$  on vuotoilman aiheuttama johtumislämpökuorma [W],  $\dot{Q}_{sis}$  on sisäisten kuormien aiheuttama lämpökuorma [W],  $\dot{Q}_{aur}$  on auringonsäteilyn aiheuttama lämpökuorma [W].

### 2.4.3 Lämmöntuottolaitokset

Lämmöntuottolaitokset voidaan mitoittaa poiketen lasketusta lämmitystehon tarpeesta. Diplomityössä on ajatuksena tutkia energijärjestelmien mitoitustehoa juuri tämän mahdollisuuden huomioiden. Energijärjestelmä voidaan mitoittaa poiketen lasketusta lämmitystehosta tavanomaisissakin rakennuksissa, kun huomioidaan hetkellinen mitoittava tehontarve dynaamisen energiasimuloinnin avulla. Lisäksi esimerkiksi varaavien järjestelmien teho saattaa olla huomattavasti suurempi kuin jatkuva lämmitysteho, mutta järjestelmään voidaan tuottaa vuorokautinen energia lyhyessä ajassa. Toisaalta taas lämpimän käyttöveden huipputeho saattaa tehollisesti olla hyvin korkea, mutta järkevää ei ole silti mitoittaa lämmöntuottolaitosta huipputehon mukaan. Lämmöntuottolaitoksien mitoituksessa on otettava huomioon itse tuotantolaitoksen sekä jakelujärjestelmän hyötysuhteet. (RT RakMK-103174 2018, 27.)

Kaukolämpökeskuksen lämmitystehontarve määritellään rakentamismääräyskokoelman määräyksien ja ohjeistuksien mukaisesti, ja muissa kuin uudisrakennuksissa lämmitystehontarve lasketaan käytettävissä olevien kulutustietojen sekä mittauksien mukaisesti. Lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimet mitoitetaan suurimman lämmitystehontarpeen mukaisesti, ja käyttöveden lämmönsiirrin mitoitetaan lämpimän käyttöveden jakojohdon

mitoitusvirtaaman mukaan. Uudisrakennuksien ja laajennusosien mitoituslämpötilat valitaan niin, että lämmönjaon- ja luovutuksen lämpöhäviöt ovat mahdollisimman pienet. (K1 2013, 8.)

Kolmen vuosikymmenen aikana maalämpö on kehittynyt suosituksi, yhä yleisemmäksi ja standardimuotoisemmaksi lämmitysmuodoksi. Historiassa öljykriisi on edistänyt maalämmön markkina-asemaa, ja tällä hetkellä ilmaston muutoksen torjuminen on yksi tärkeistä motivaattoreista maalämpöön siirtymisessä. (Heiskanen, ym. 2012, s. 285.) Päästöjen vähentäminen rakennuksien energiapuolissa ei kuitenkaan ole täysin suoraviivaista, sillä suomalainen rakennuskanta uudistuu hitaasti, jolloin olennaiseen rooliin tulee olemassa olevien rakennuksien energiakorjaukset. Maalämpö on investointina kallis, vaikkakin matalat käyttökustannukset sekä helppokäyttöisyys ovat sen etulyöntiasema. (Motiva, 2020.) Tällä hetkellä maalämpö on Suomen suosituin lämmitysmuoto omakoti- ja paritaloissa, mutta kasvattanut osuuttaan myös asuinkerrostaloissa (Suomen virallinen tilasto, 2018).

Maalämpöpumput mitoitetaan vaihtoehtoisesti osa- tai täysteholle. Osateholle (60-80%) mitoitettu lämpöpumppu tuottaa arvioilta 95-99% vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta, ja loput tuotetaan esimerkiksi varaajan vara/sähkövastuksien turvin. Täysiteholle mitoitettu maalämpöpumppu kattaa energiantarpeen kovimmillakin pakkasilla ilman lisävastuksia. Maalämpöpumppua ei välttämättä kannata mitoitaa kattamaan koko rakennuksen huipputehontarvetta paremman kustannustehokkuuden sekä kompressorin pidemmän eliniän takia. Maalämmön lämmönkeruupiiri mitoitetaan tilojen sekä käyttöveden lämmityksen tarvitseman vuotuisen energian mukaisesti, eikä itse lämpöpumpun tehomitoituksella ole suurta vaikutusta keruupiirin mitoitukseen. (Motiva, 2020.)

Lämmityskattila mitoitetaan huipputehon mukaan, huomioiden sekä kattilan että lämmönjakoverkoston hyötysuhteet. Kattilajärjestelmiä voidaan käyttää lämmöntuotantoon niin pienkiinteistöissä, suurkiinteistöissä että aluelämpölaitoksissa. Kattilajärjestelmiin kytketään aina varaaja. Kattilajärjestelmän mitoitukseen vaikuttaa siis itse kattilan lisäksi varaajan tilavuus, ja varaajan tilavuus vaikuttaa myös lämmityskertojen tiheyteen. Lämmityskattilajärjestelmissä polttoaineena voi olla polttoöljyä, maakaasua tai kiinteitä biopolttoaineita, kuten puuta, haketta, pellettejä tai turvetta. (Energiatehokas koti, 2020.)

Reuna-ehtona kaikkien lämmöntuottolaitoksien mitoitukselle on taata optimaalinen sisäilmasto kaikissa tiloissa ja olosuhteissa, ja toisena reunaehtona on tyypillisesti investointikustannukset. Lämmöntuottolaitoksen mitoitus sekä valinta optimointia huomioiden taloudelliset sekä tekniset seikat. Ylimitoituksella on epäsuotuisa vaikutus investointikustannuksiin, mutta alimitoitus voi lisätä elinkaarikustannuksia sekä osaltaan heikentää järjestelmän hyötysuhdetta. Energiatehokkaat järjestelmät, kuten lämpöpumppujärjestelmät, ovat investointina kalliita suhteessa tehoonsa. Tällöin energijärjestelmien ylimitoitus on vaikuttaa väistämättä investointikustannuksien kasvuun. Mitä enemmän mennään mitoitustehossa sekä kustannuksissa yli budjetoidun, sitä suurempi paine tulee leikata kustannuksia esimerkiksi taloteknisissä järjestelmissä, energiatehokkuuden kustannuksella. (Hilpinen, 2021.)

## **2.5 Rakennusten energiasimulointi**

Energiasimulointiohjelmistoja on kehitetty jo usean vuosikymmenen ajan ja käytetään yhä laajemmassa mittakaavassa kestäväen kehityksen kiristyvien vaatimusten sekä energiatehokkuusmääräyksien toimiessa taustalla tehostavana vaikuttajana. Energiasimulointiohjelmiä on esimerkiksi TRNSys, DOE-2, Energy Plus tai tässä työssä käytetty ohjelmisto IDA ICE. IDA ICE mahdollistaa yksityiskohtaisen, dynaamisen monivyöhykkeisen simuloinnin, johon voidaan tuoda muuan muassa halutut ilmastotiedot, standardit sekä laite- ja materiaalitiedot. IDA ICE ohjelmisto on yhteensopiva kaikkien ArchiCAD-, Revit-, AutoCAD Architecture- sekä MagiCAD-tiedostojen kanssa. (Equa, 2020.)

Todellisuudessa rakenteissa ja rakenteiden pinnoilla lämmön siirtyminen on dynaamista, eli ilmiö on jatkuvassa muutoksessa. Esimerkiksi ulkolämpötila, auringon säteily sekä sisäiset lämpökuormat ovat jatkuvia muuttujia. (Sirén, 2015, 3.) Dynaaminen energiasimulointi on näihin useiden samanaikaisten tekijöiden huomioinnissa lähes välttämätön työkalu. Energiatehokkaaseen ja elinkaarikustannuksiltaan järkevien rakennuksien suunnittelussa yksityiskohtaiset energiasimulointiohjelmit ovat tärkeässä roolissa, sillä vastaavien laskelmien tuottaminen ilman dynaamista energiasimulointia voisi olla hyvin työlästä, ellei mahdotonta. Lisäksi energiasimulointimalleilla on mahdollisuus esittää erilaisia skenaarioita ja optimointeja päätöksenteon tueksi jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa. Rakennuksen käyttämä

energiateho kohdistu yhä suuremmalta osin ilmanvaihdon ja muiden taloteknisten järjestelmien kulutukseen. Tilalämmityksen osuus on ollut ajan mittaan laskusuhdanteinen. Energiasimulointimalleilla voidaan analysoida tulevaisuuden energiapotentiaalimahdollisuuksia, kuten esimerkiksi kysyntäjoustoja sekä ilmanvaihdon ja lämmityksen tarpeenmukaisen ohjauksen vaikutusta. (Li et al. 2015, 202-204.) Dynaaminen simulointiohjelma toimii riittävän pienillä aika-askeleilla ja huomioi dynaaminen lämmönsiirron ympäristönsä sekä ympäröivien tilojen välillä. Rakennuksen tietomallinnuksen (BIM) hyödyntäminen suunnittelupöydällä on lisääntynyt, ja energiasimuloinneilla on tärkeä rooli rakennuksen energiatehokkuuden, laite- ja materiaalivalintojen, elinkaarisuunnittelun sekä kustannustehokkuuden näkökulmista ja myös sisäilmasto-olosuhteiden analysointiin. (Crawley et al. 2008, 672.)

Energiasimulointityökaluilla tehtävät simuloinnit voi karkeasti jakaa kahteen kategoriaan: energiasimuloinnit kokonaiselle rakennukselle ja teho- sekä olosuhdesimuloinnit yksittäisille tiloille. Energiasimuloinnit kattavat kokonaisen vuoden, kun taas teho- ja olosuhdesimuloinnit tehdään mitoituspäivälle. Energiatehokkuusvaatimusten tiukentuessa, energiajärjestelmiin on alettu kiinnittää enemmän huomioita, ja niistä on tullut monimutkaisempia sekä kalliimpia. Energiatuottojärjestelmien mitoitus on perinteisesti tehty melko ”varman päälle”, mikä syö erityisesti kalliimpien järjestelmien kannattavuutta. Simuloinneilla mitoitustarkkuutta voitaisiin parantaa, mutta se vaatii edellä mainittujen kahden kategorian yhdistämistä koko rakennuksen kattavaksi mitoitustehosimuloinniksi. Simulointiohjelmiston kannalta tämä ei ole mikään ongelma, mutta koko rakennuksen mitoitustehon kannalta oleellisten parametrien huomioiminen vaatii vielä järjestelmällistä kehittämistä ja tutkimusta. (Hilpinen, 2021.)

### **2.5.1 Simuloinnin laskentaparametrit**

Rakennuksen energiasimuloinnin tarvitaan seuraavat lähtötiedot:

Rakennuttaja/käyttäjän edustaja

- Tilojen käyttöajat, ihmismäärät, laitekuormat

Arkkitehtisuunnittelu

- Taso-, julkisivu-, ja leikkauspiirustukset, ikkunoiden g- ja u-arvot, tiedot aurinkosuojauksesta, pinta-alat.

### Rakennesuunnittelu

- Rakennetyypit, rakenteiden U-arvot, kylmäsiltojen lisäkonduktanssit, ilmavuotoluku.

### LVI-suunnittelu

- Ilmamäärät, lämmitys-, ja jäähdytysrajat, ilmanvaihdon sekä ilmanvaihtokoneiden toimintaperiaate, aikataulu ja lämmöntalteenoton hyötysuhde.

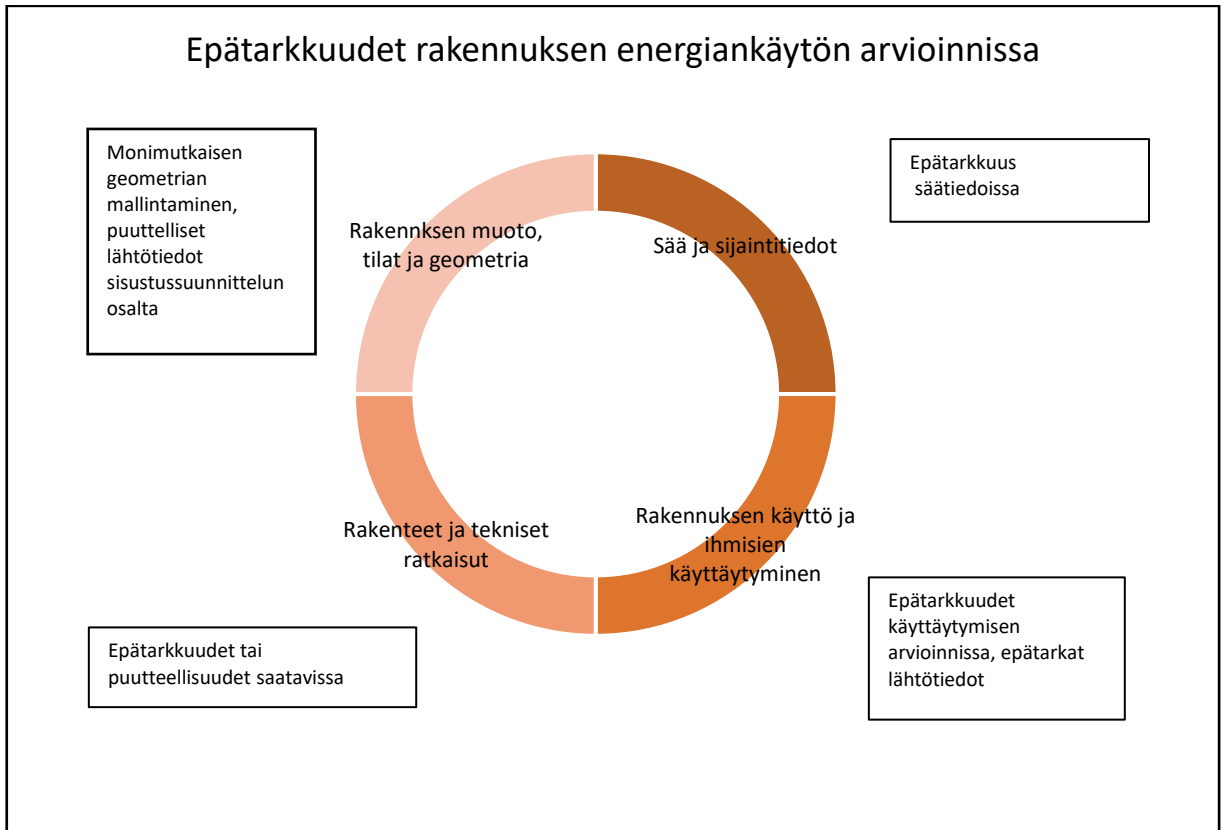
### Sähkösuunnittelu

- Valaistustehot, tieto mahdollisesta tarpeenmukaisesta valaistuksesta ja tieto muista mahdollisista sähkökuormat. (Egan et al. 2018, 176.)

Tutkimuksessa keskitytään näistä lähtötietoina syötettävistä simulointiparametreista tilojen käyttöaikoihin, sisäisiin lämpökuormiin kuten ihmismäärien ja laitekuormien sekä ilmanvaihdon toimintaperiaatteeseen.

## 2.5.2 Simulointimallien luotettavuus

Rakennuksen käyttöä, ihmiskuormia, valaistusta arvioitaessa voidaan nojata sisäilmasto- luokitukseen tai asetuksen mukaisiin arvoihin, mikäli todellista käyttöä ei tiedetä. Energiasimuloinnin tavoitteena on simuloida rakennuksen energiankulutusta mahdollisimman todennukaisesti, mutta ennusteissa on havaittu kahden tyyppisiä virheitä; inhimilliset virheet suunnittelussa, rakentamisessa ja energiasimuloinnin mallinnuksessa sekä toisena energiasimuloinnin lähtötietojen epätarkkuus tai virheellisyys, kuten kuvassa 5. on esitetty. Lähtötietojen puutteellisuus voi aiheuttaa energiasimulointimalliin epätarkkuutta, ja rakennuksen vakioidun käytön standardiarvot voivat poiketa todellisesta käytöstä. Lisäksi useimmiten rakennuksien sijainnin tarkempia ominaisuuksia ei välttämättä sisällytetä energiasimulointimalliin. Asukkaiden tai käyttäjien käyttäytymisellä ja kulutustottumuksilla on kriittinen rooli, ja useimmiten simuloinnissa tehdään arvio ihmisten, valaistuksen ja laitteiden toiminnasta. Simulointipohjaisen mitoitusmenetelmän kannalta on oleellista huomioida simulointimallin luotettavuus ja mahdolliset simulointimallin virheet, mikäli tavoitteena on pienentää simulointien avulla energiajärjestelmien mitoitustehoa. (Delzende 2020, 2-3.)



**Kuva 5.** Mahdolliset epätarkkuudet energiasimulointimallissa. (Delzende, E. 2020, 2.)

### 3 MENETELMÄN KEHITTÄMINEN

Energiajärjestelmien simulointipohjaisen mitoitusmenetelmän lähtökohtana on laatia koko rakennuksen kattava tavoite-energasimulointi, jonka lisäksi tutkitaan tarkemmin simuloinneissa vaikuttavien parametrien muutoksia. Menetelmässä arvioidaan simulointipohjaisesti lämmityksen- sekä jäähdytyksen tehomitoituksia, mutta menetelmässä hyödynnetään myös perinteistä mitoitusta lämpimän käyttöveden mitoituksen sekä oviverhokoneiden osalta. Simulointipohjaisesti energiajärjestelmien mitoitustehoja tutkitaan kolmessa kohteessa; opetusrakennuksessa, liike-, sekä hybridikiinteistöissä.

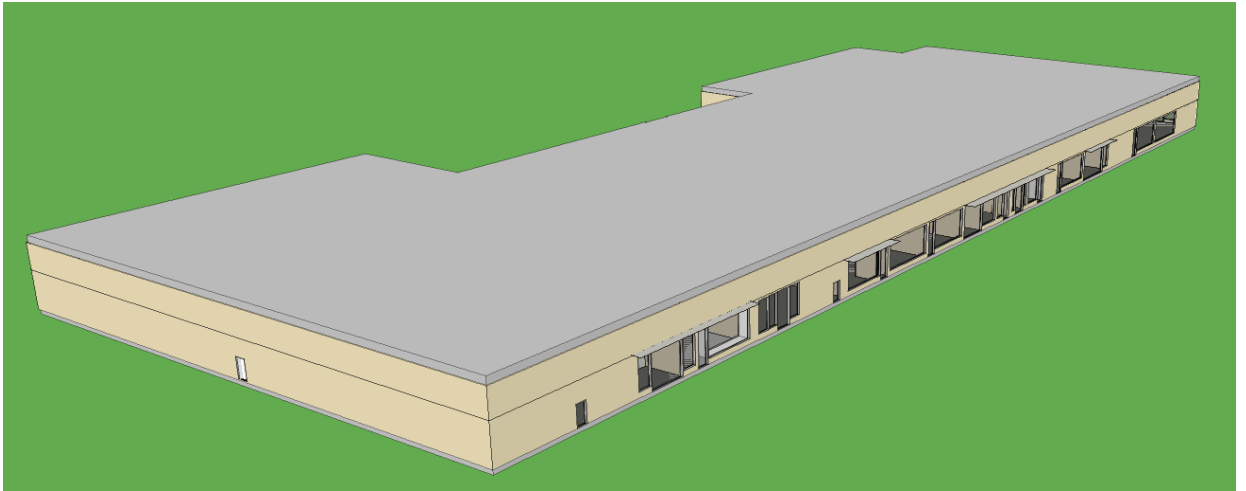
### 3.1 Tutkittavat rakennukset

Tutkimukset kohdentuvat kolmeen erityyppiseen rakennukseen; liikerakennukseen, opetusrakennukseen sekä hybridikiinteistöön, joka sisältää toimistotiloja, hotellin, liiketiloja sekä kuntosalin ja kaksikerroksisen autohallin. Jokainen IDA ICE-energiasimulointimalli on mallinnettu tavoite-energiantuotuslaskelman vaatimuksien mukaisesti, huomioiden rakennuksen todelliset rakenne, arkkitehti-, talotekniikka-, sekä sähkösuunnitelmat. Mahdollisten lähtötietojen puuttuessa on hyödynnetty Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisia vertailuarvoja, tai vastaavasti sisäilmastoluokituksen 2018 mukaisia tavoitearvoja. Tapauskohtaisesti tutkittavissa kiinteistöissä on saatettu toteuttaa mitoituslaitteisiin kohdentuvia leikkauksia, esimerkiksi huomioitu ovi-verhokoneiden yhdenaikaisuuskertoimia. Näissä tapauksissa tulosten yleistettävyyden vuoksi on tehty vertailu huomioimatta nämä mitoituslaitteiden leikkaukset. Jokaisessa rakennuksessa tutkitaan lämpökuormien, ihmisten käytöksen sekä dynaamisen säädäntövaikutuksia lämmitystehtäviin. Jäähdytykseen vaikuttavia parametreja tutkitaan ainoastaan hybridikiinteistöissä, jonka moninaisissa tiloissa on käytössä sekä jäähdytystä ilmanvaihdon kautta että tilakohtaisia jäähdytyslaitteita.

#### 3.1.1 Case 1, liikerakennus

Ensimmäinen tutkittava rakennus on Etelä-Suomeen rakenteilla oleva yksikerroksinen liikekiinteistö, jonka lämmitetty nettoala on 7703 m<sup>2</sup>. Tiloissa sijaitsee myymälöitä, puolilämpimiä varastotiloja, kuntosali sekä ravintola/kahvila. Liikerakennuksessa pääsääntöisesti hyödynnetään ilmalämmitystä pois lukien toimisto- ja taukotilat. Rakennuksen lämmitystehosta 7 % kuluu tilalämmitykseen, 34% oviverhokoneiden lämmitykseen sekä 59% ilmanvaihdon lämmitykseen. Kokonaislämmitysteho rakennuksessa on 765 kW. Lämpimän käyttöveden tuottoon vaadittava lämmitysteho on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle, eikä täten ole huomioitu lämmitystehtäviin ja kaumissa. Tilalämmityksen pieni osuus selittyy rakennuksen ilmalämmitykseen pohjautuvalla lämmönjakoperiaatteella, ja patteriverkostoa hyödynnetään ainoastaan muutamassa yksittäisissä toimisto- ja sosiaalituloissa. Lämmitysenergia tuotetaan maalämmöllä. Liikerakennuksen energiasimuloinneissa pääpaino on lämmitystehtävisimuloinneissa; ilmanvaihdossa ja tilalämmityksessä sekä niihin vaikuttavissa parametreissa. Rakennukselle tehtävät simuloinnit näkyvät taulukossa 3. esitettynä.





**Kuva 6.** Case 1. liikekiinteistö

**Taulukko 3.** Liikerakennuksen lämmitystehosimuloinnit

Liikerakennus	
Simulointi I	Lämmitystehon simulointi staattisella mitoituslämpötilalla.
Simulointi II	Lämmitystehon simulointi ottaen huomioon ilmanvaihdon ohjauksen CO <sup>2</sup> -pitoisuuden mukaan.
Simulointi III	Lämmitystehon simulointi dynaamisella testisäädätällä.
Simulointi V	Lämmitystehon simulointi, otetaan huomioon dynaaminen säädädata sekä sisäiset lämpökuormat (laitteet, valaistus ja ihmiset.)
Henkilötiheyksien muutoksen tarkastelu palvelualueittain	Lämmitystehon simulointi, tutkitaan lämpökuormien muutosta henkilötiheyksillä 0.02 hlöä/m <sup>2</sup> sekä 0.10 hlöä/m <sup>2</sup> .

### 3.1.2 Case 2, opetuskiinteistö

Opetuskiinteistö on vuonna 2018 valmistunut kaksikerroksinen päiväkotikoulu Pohjois-Pohjanmaalle, jonka nettoala on 4511 m<sup>2</sup>. Koulu ja päiväkotikiinteistö ovat mitoitettu 450 oppilaan ja

henkilökunnan (30 henkilöä) käytölle. Opetuskiinteistössä ei ole jäähdytystä, jolloin energia-simuloinnin painopisteenä on täten lämmitystehon simuloinnit ja eri parametrien vaikutus lämmityksen huipputehoon. Lämmitystehosta oviverhokoneet kattavat 14%, tilalämmitys 19% ja ilmanvaihto 67% kokonaistehontarpeen ollessa 620 kW. Opetusrakennuksen osalta tarkastellaan myös tilakohtaisesti erikseen lämpökuormien ja säädätöiden vaikutusta lämmitystehoon, kun liikunta- ja opetustiloissa hyödynnetään ilmamääräsäätöistä järjestelmää. Koulun käyttöprofiilia on pyritty hahmottamaan todenmukaista käyttöä jäljittelevää käyttäjäprofiilia, sillä yhteenlaskettuna tilojen mitoittava henkilömäärä olisi 1650 hlöä. Rakennukselle tehtävät simuloinnit näkyvät taulukossa 4.



**Kuva 7.** Opetuskiinteistö

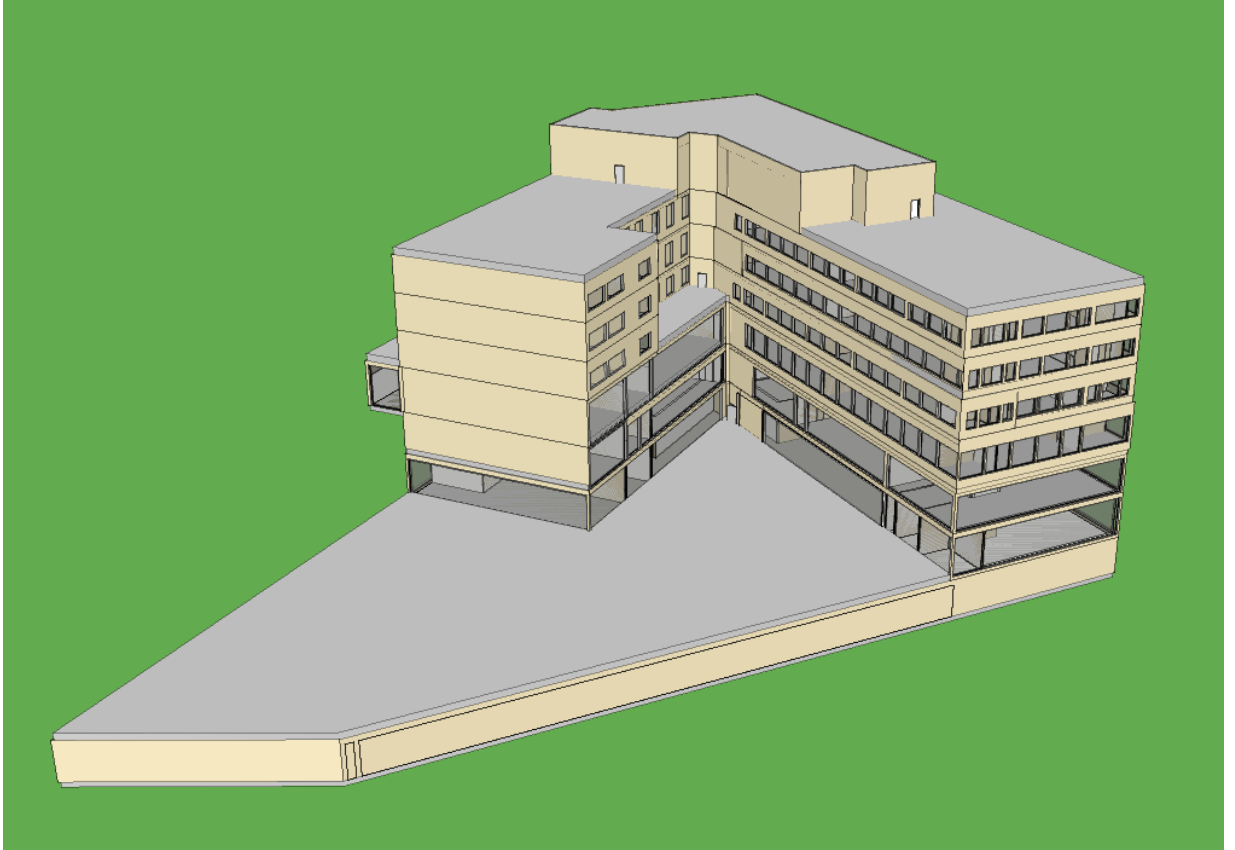
**Taulukko 4.** Opetuskiinteistön lämmitystehosimuloinnit

Opetuskiinteistö	
Simulointi I	Lämmitystehon simulointi staattisella mitoituslämpötilalla.
Simulointi II	Lämmitystehon simulointi dynaamisella testisäädalla.
Simulointi III	Lämmitystehon simulointi dynaamisella testisäädalla ja huomioiden lämpökuormat koko rakennuksessa.
Opetustilojen tarkastelu I	Lämmitystehon simulointi, tarkastellaan opetustilojen lämmitystehon muutoksia omana kokonaisuutenaan huomioidessa ainoastaan lämpökuormat.
Opetustilojen tarkastelu II	Lämmitystehon simulointi, tarkastellaan opetustilojen lämmitystehon muutoksia omana kokonaisuutenaan huomioidessa lämpökuormat sekä dynaaminen testisäädata.
Liikuntatilojen tarkastelu I	Lämmitystehon simulointi, tarkastellaan liikuntatilojen lämmitystehon muutoksia omana kokonaisuutenaan huomioidessa lämpökuormat sekä dynaaminen testisäädata.
Liikuntatilojen tarkastelu II	Lämmitystehon simulointi, tarkastellaan liikuntatilojen lämmitystehon muutoksia omana kokonaisuutenaan huomioidessa lämpökuormat sekä dynaaminen testisäädata.

### 3.1.3 Case 3, hybridikiinteistö

Tutkittavista rakennuksista käyttötarkoitukseltaan monipuolisin ja suurin on pääkaupunkiseudulle sijoittuva seitsemän kerroksinen 12760 m<sup>2</sup> hybridikiinteistö, joka pitää sisällään toimistotiloja neljässä kerroksessa, kuntosalin, hotellin, kauppa- ja liiketiloja sekä autohallin kahdessa kerroksessa. Kiinteistön perinteisesti mitoitettusta lämmitystehosta 10% kohdistuu oviverhokoneille,

25% tilalämmitykseen ja 65% ilmanvaihtoon kiinteistön kokonaislämmitystehon ollessa yhteensä 1330 kW. Hybridikiinteistössä pääpaino on jäähdytys­simuloinneissa ja erityyppisten simuloitien vaikutus vaadittavaan jäähdytystehoon. Hybridikiinteistön simuloinnit on esitetty taulukossa 5.



**Kuva 8.** Hybridikiinteistö

**Taulukko 5.** Hybridikiinteistön energiasimuloinnit.

Hybridikiinteistö	
Simulointi I	Lämmitystehon simulointi staattisella mitoituslämpötilalla.
Simulointi II	Lämmitystehon simulointi dynaamisella testisäädätällä.
Simulointi III	Lämmitystehon simulointi, tarkastellaan lämmitystehon muutoksia huomioidessa lämpökuormat sekä dynaaminen testisäädätä.
Simulointi IV	Jäähdytystehon simulointi, ASHRAE mitoituspäivä (27.5 °C/54 kJ/kg) sekä 100% käyttöaste.
Simulointi V	Jäähdytystehon simulointi, ASHRAE mitoituspäivä (27.5 °C/54 kJ/kg) sekä laadittujen käyttöprofiilien mukainen käyttöaste.
Simulointi VI	Jäähdytystehon simulointi, sisäilmastoluokituksen 2018 mitoituspäivä (27.5 °C/57 kJ/kg) sekä 100% käyttöaste.
Simulointi VII	Jäähdytystehon simulointi, sisäilmastoluokituksen 2018 mitoituspäivä (27.5 °C/57 kJ/kg) sekä laadittujen käyttöprofiilien mukainen käyttöaste.
Simulointi VIII	Jäähdytystehon simulointi, testisäädätä sekä 100% käyttöaste.
Simulointi IX	Jäähdytystehon simulointi, testisäädätä sekä laadittujen käyttöprofiilien mukainen käyttöaste.

### 3.2 Energiajärjestelmien mitoitus

Energiajärjestelmien simulointipohjaisessa mitoituksessa on keskitytty ihmisten, laitteiden ja valaistuksen vaikutuksiin sekä säädätän muutoksiin ja simulointitapoihin. Simuloinneissa rakennuksen rakenteelliset ominaisuudet, geometria, sijainti ja mahdolliset varjostukset on pidetty alkuperäisten suunnitelmien tai rakentamismääräyksien vähimmäisvaatimusten mukaisina. Energiasimuloinneissa painotus on lämmitys- ja jäähdytysenergian simuloinneissa, ja lämpimän käyttöveden kulutus on simuloinneissa arvioitu perinteisen mitoituksen mukaisesti. Oviverhokoneiden toimintaa ei ole huomioitu energiasimuloinneissa, sillä niiden toimintaan eivät tutkittavat parametrit vaikuta. Oviverhokoneiden mitoitettun lämmitystehon

optimoinnissa on olennaisin seikka yhdenaikaisuuden huomioiminen. Simulointituloksissa oviverhokoneiden yhdenaikaisuuksia on arvioitu yhdenaikaisuuskertoimin, jotka on arvioitu rakennuksen käyttötarkoitus, oviverhokoneiden sijoittelu ja rakennuksen käyttöprofiili huomioiden. Tutkimuksen ulkopuolelle on jätetty mahdolliset valmistuskeittiöiden ilmanvaihtojärjestelmät erillispoistoineen sekä kylmäkoneet.

Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla varustetuissa tiloissa on mahdollista, että sisäiset lämpökuormat kasvattavat lämmitystarvetta. Näin tapahtuu silloin kun sisäisten lämpökuormat aiheuttavat suuremman raitisilmantarpeen säilyttääkseen optimaaliset sisäilmasto-olosuhteet. Kasvanut raitisilman tarve vaatii enemmän lämmitystehoa kuin mitä sisäiset lämpökuormat tuovat tilaan. Perinteisessä mitoituksessa tätä ilmiötä ei voida huomioida, mutta simuloinnissa se on mahdollista. Haasteena on se, ettei etukäteen ei tiedetä kasvattavatko vai laskevatko sisäiset lämpökuormat mitoitusastetta. Tähän vaikuttavat esimerkiksi tilojen käyttötarkoitus, ihmisten aktiivisuustaso, ilmanvaihto sekä tilojen geometria.

### 3.2.1 Säädädata

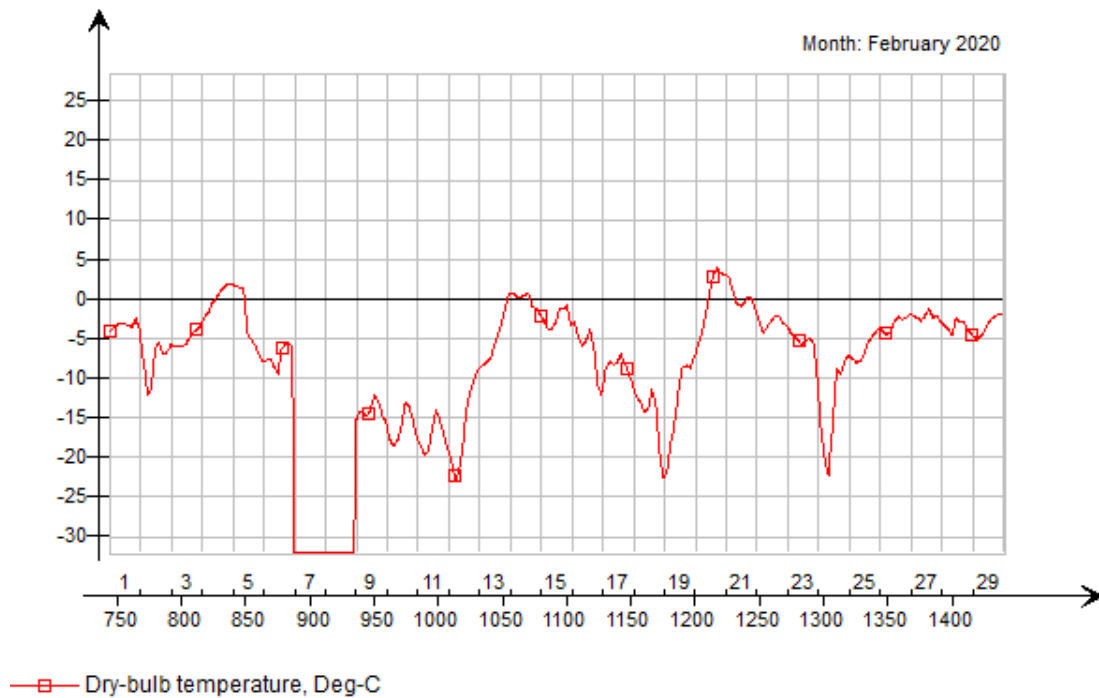
Energiasimuloinnit toteutetaan staattisella Ympäristöministeriön 1010/2017 asetuksen mukaisella mitoituslämpötilalla taulukon 6. mukaisesti, tai vastaavasti dynaamisen testisäädätin avulla.

**Taulukko 6.** Säävyöhykkeet ja mitoittavat ulkolämpötilat (Ympäristöministeriön asetus 1010/2017).

Säävyöhyke	Mitoittava lämpötila
Säävyöhyke I	-26 °C
Säävyöhyke II	-29 °C
Säävyöhyke III	-32 °C
Säävyöhyke IV	-38 °C

Dynaamisissa simuloinneissa lämmitystehoa arvioidessa on käytetty rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen laskentaa varten kehitettyä testivuotta (TRY2012), jota on muokattu asettamalla yksittäisiin päiviin mitoituslämpötila säävyöhykkeen mukaisesti.

Tämä on toistaiseksi ainoa tapa huomioida mitoituslämpötilan vaikutus tehontarpeeseen dynaamisen simuloinnin yhteydessä. Kuvassa 9. on esimerkki III-vyöhykkeen dynaamisesta säädatasta, jossa on esitetty lämpötilat helmikuun osalta. Testivuoden tavoite on kuvata kunkin säävyöhykkeen olosuhteita niin sanotusti tavanomaisena vuotena, jossa eivät korostu harvinaiset ja poikkeukselliset olosuhteet ja siinä ei välttämättä esiinny mitoitusolosuhteita. Täten sitä ei voi käyttää sellaisenaan järjestelmien mitoittamiseen. Testivuoden sääolosuhteet on koottu vuosien 1989-2018 tunneittain kerättyjen sääolosuhteiden mukaan, ja kutakin kuukautta kohden on laadittu sääolosuhteet, jotka kuvasta mahdollisimman hyvin keskimääräisiä ilmasto-oloja. Testivuoden TRY2012 sään tilastolliset jakaumat ovat muistuttaneet mahdollisimman paljon jakson 1989-2018 keskimääräisiä jakaumia. Testivuotta kuvaavassa tiedostossa on tuntitasolla huomioitu lämpötila, ilman suhteellinen kosteus, tuulen suuntaus ja nopeus, auringon kokonaissäteily ja hajasäteily sekä sademäärät. Testivuoden aineiston avulla on myös mahdollista huomioida eri vyöhykkeiden ilmastojen erilaisuus. (Hutila et al. 2011, 9-10.) Valtioneuvosto tiedottanut julkaisevansa vuonna 2021 Ilmatieteenlaitoksen laatimat uudet säätietoaineistot, joita on mahdollista käyttää mitoittaessa rakennuksen energiantarvetta sekä rakennusfysikaalista tarkastelua varten. Niin kutsuttu testivuosiaineisto pyrkii kuvaamaan keskimääräisiä olosuhteita neljällä energialaskennan ilmastovyöhykkeellä. Tämänhetkisissä energiamääräyksissä näitä säätietoja ei vielä käytetä, mutta ne otetaan käyttöön seuraavassa määräysuudistuksessa. (Valtioneuvosto, 2020.)



**Kuva 9.** Dynaamisen simuloinnin esimerkkisäädäta.

Kesäajan lämpötilan laskennassa sekä jäähdytyslaitteiden mitoituksessa käytetään standardin ISO 15927-4:2005 mukaista energialaskennan testivuotta tai vaihtoehtoisesti Ilmatieteenlaitoksen testivuoden säätietoja tai erikseen sopimusasiakirjoissa esitettyä ajanjaksoa. Ilmastoinnin kesätilanteen mitoituksessa käytetään muualla Suomessa ulkoilman mitoittavana entalpiana 57 kJ/kg ja Pohjois-Suomessa 52 kJ/kg. (Sisäilmastoluokitus 2018, 14.)

Diplomityön jäähdytys­simuloinneissa käytetään kolmea erilaista mitoitustilannetta tai testisäädätaa, josta esimerkkinä alla olevassa kuvassa 10. on esitetty energiasimulointiohjelmiston oletussimuloinnin mitoitustiedot, jotka pohjautuvat AHSRAE:n vuoden 2013 määrittelemi­in paikallisiin mitoit­usolosuhteisiin, eli tässä tapauksessa mitoitustiedot kohdentuvat mittauspaikalle 029740, Helsinki-Vantaa. Mitoitusarvoihin on määrit­elty kesäajan olo­suhteisiin suurin ja pienin mahdollinen kuivalämpötila, suurin mahdollinen märkälämpötila, tuulen suunta ja nopeus.



Design day data

Design data file

ASHRAE 2013\029740.tbl

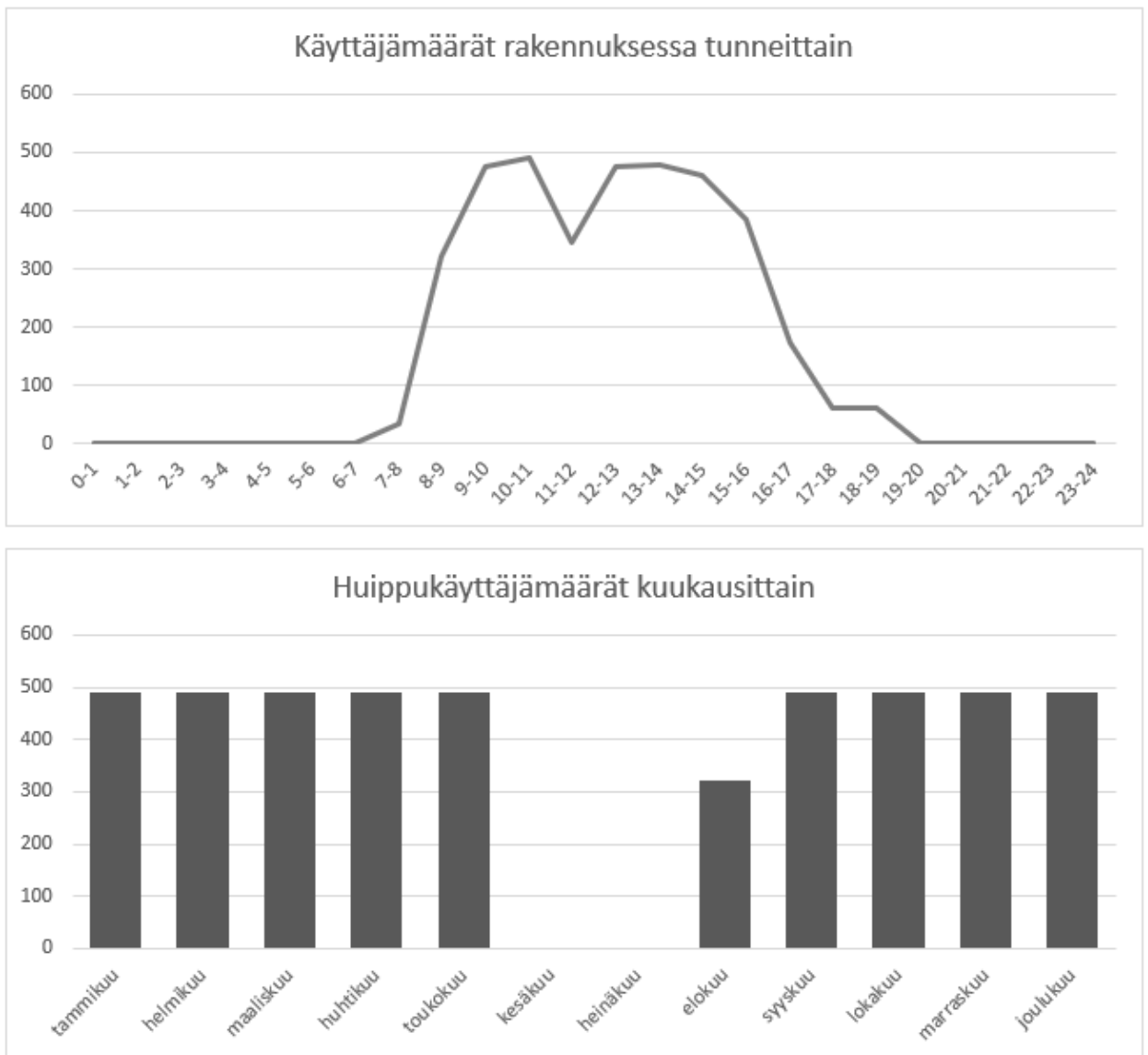
User-defined design days

	Winter	Summer	
Dry-bulb min	-22.1	15.1	°C
Dry-bulb max	-16.2	27.5	°C
Wet-bulb max	-16.4	18.6	°C
Wind direction	0	200	°
Wind speed	2.8	4.6	m/s
Clear-sky tau_b	0.323	0.346	
optical depth tau_d	2.403	2.379	

**Kuva 10.** Jäähdytys­simuloinnin mitoitusolosuhteet, esimerkkinä IDA ICE oletusmitoitus jäähdytys­simuloinnissa.

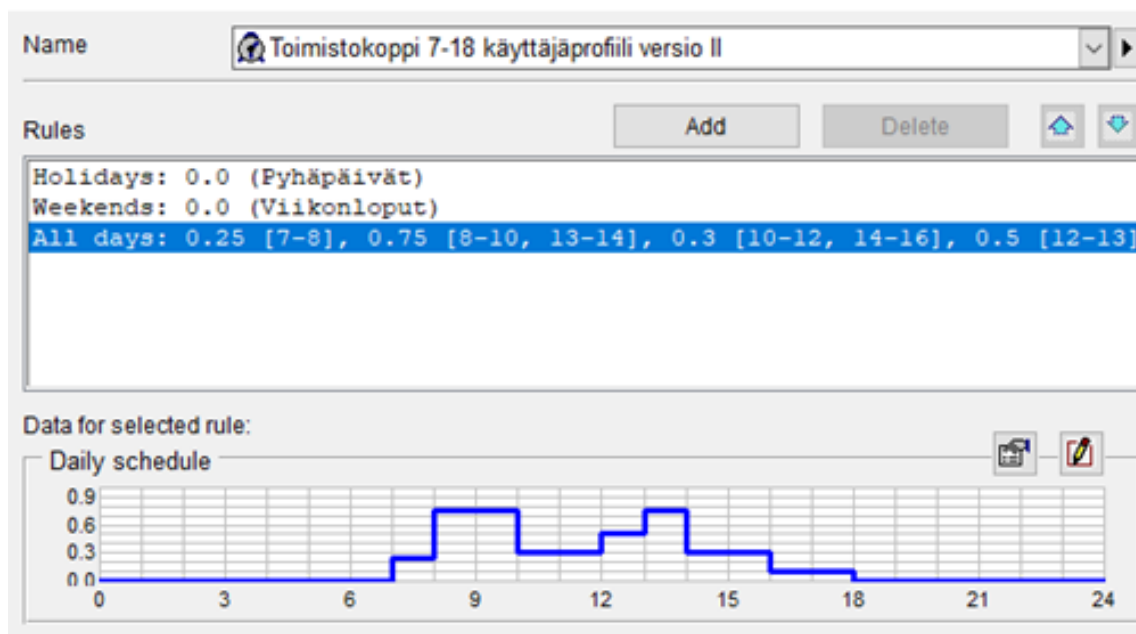
### 3.2.2 Rakennuksen käyttöprofiilien arviointi

Opetuskiinteistössä sekä hybridikiinteistössä arvioitiin käyttäjien todennukaisen käytön vaikutuksia lämmitys- ja jäähdytystehoihin. Opetuskiinteistön käyttöprofiili mallinnettiin kuvan 11. mukaisesti. Koulu on mitoitettu 481 henkilölle, mutta mikäli tilojen mitoitettut ihmismäärät laskettaisiin yhteen, olisi mitoitus 1645 henkilöä. Perinteisesti ilmanvaihto mitoitetaan tilan maksimi-ihmismäärän mukaan, vaikka todellisuudessa on erittäin epätodennäköistä kaikkien tilojen käyttöasteen olevan yhdenaikaisesti 100%. Opetusrakennuksen käyttöprofiili on luotu koulun realistisen arvioin mukaan, eikä sen laadinnassa ole käytetty kiinteistön todennukaisia käyttötietoja.



**Kuva 11.** Käyttäjämäärät opetuskiinteistössä tunneittain sekä huippukäyttäjämäärät kuukausittain määriteltynä.

Kolmannessa energiasimulointimallissa hybridikiinteistössä ihmisten käyttöastetta arvioidaan kuvan 12. esimerkin mukaisien käyttöprofiilien mukaan. Toimistotiloille, ravintoloille, kuntosalitiloille sekä myymälätiloille on laadittu omat käyttöprofiilinsa, ja osa toimistotiloista suuren lukumäärän vuoksi on jaettu erityyppisiin käyttöprofiileihin käytön hajauttamisen vuoksi. Käyttäjäprofiiliin määritellään tuntitasolla käyttöaste arkipäiville, viikonlopuille sekä loma-ajoille.



Kuva 12. Esimerkki käyttäjäprofiilista toimistotilojen toimistuhuoneesta.

### 3.2.3 Tilalämmitys- ja jäähdytys

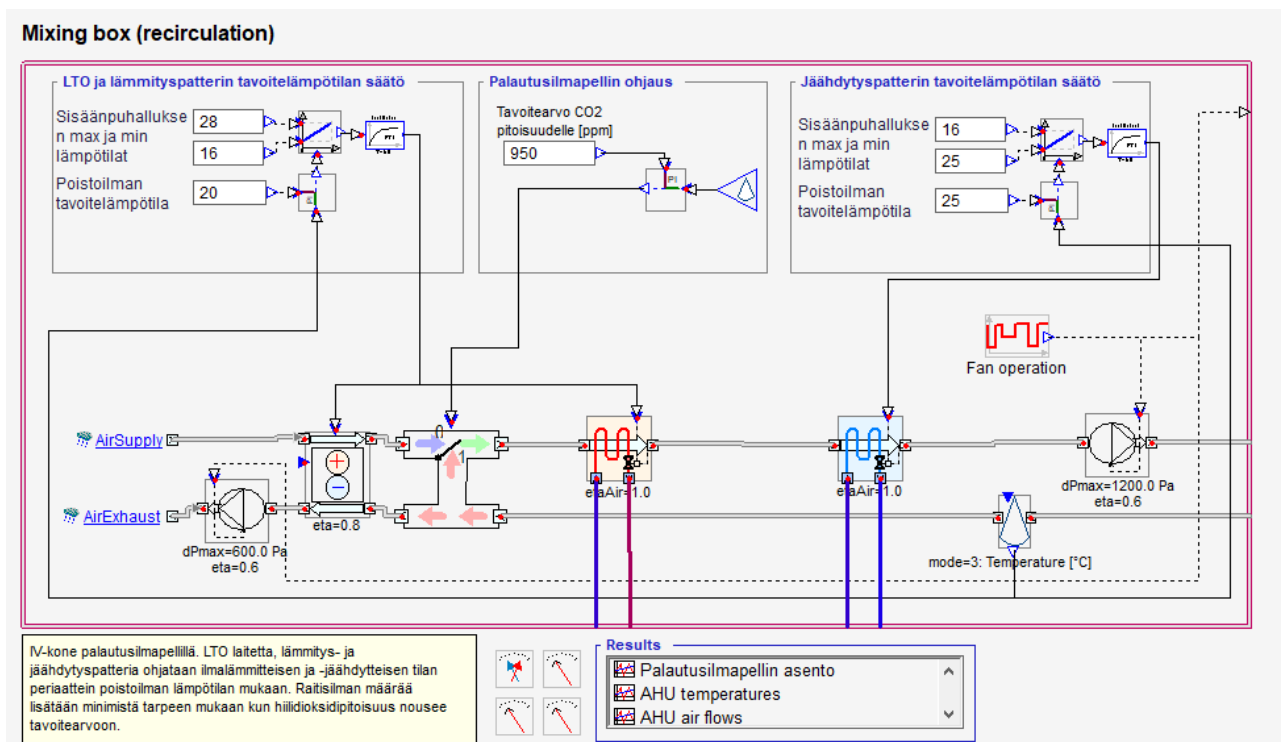
Energiasimulointimalleissa tilajäähdytyksen- tai lämmityksen teho voi simuloinneissa olla rajaton, tai toisin sanoen tehoa ei rajoiteta käytettäessä ideaalisia tilalaitteita. Energiasimulointimallissa ei oteta kantaa tilalaitteiden toimintaperiaatteeseen, tuloksissa ainoastaan esitetään tilalaitteilta vaadittava mitoitusteho. Energiasimulointimalli ottaa tilalämmitystehontarpeen laskennassa huomioon rakennuksen vaipan häviöt, vuotohäviöt sekä ilmanvaihdon häviöt. Simulointiohjelma laskee tilalaitteelta vaaditun huipputehon, jotta sisäilman lämpötila ei ylitä tai alita tiloille määriteltyjä lämmityksen tai jäähdytyksen asetusarvoja.

### 3.2.4 Ilmanvaihto

Ilmamääräsäätöisissä tiloissa ilmamäärää ohjataan tilan hiilidioksidipitoisuuden mukaan, ja hiilidioksidin määrä on asetettu pysymään opetustiloissa rajoissa 400-950 ppm. Ilmamäärän raja-arvot (min ja max) määritetään neliökohtaisesti.

Perinteisen mitoituksen lähtötiedot, kuten ilmamäärät sekä ilmanvaihdon toimintaperiaate sekä mitoitustiedot on saatu olemassa olevista LVI-suunnitelmista sekä laitevalmistajan ilmanvaihtokoneiden koneajoista. Ilmanvaihtopattereiden mitoitettut limitykset on otettu

laitevalmistajan mitoittamista koneajoista. Energiasimulointimallia varten ilmanvaihtokoneelle annetaan laitteiden asetusarot, lämmöntalteenoton hyötysuhde, ilmamäärät sekä ohjausperiaate. Kuvassa 13. on esitetty simulointimallin esimerkkinä kiertoilmaa palautuspeltien kautta hyödyntävästä ilmanvaihtokoneesta, jota ohjataan hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Energiasimulointimallia varten ilmanvaihtokoneelle syötetään ilmavirrat, ohjausperiaate, lämpötilatiedot sekä lämmöntalteenoton hyötysuhde ja jäteilman minimilämpötila lämmöntalteenoton jälkeen.



**Kuva 13.** Esimerkki ilmanvaihtokone, jossa palautusilmapellin asentoa ohjataan hiilidioksidipitoisuuden mukaan.

## 4 SIMULOINTITULOKSET

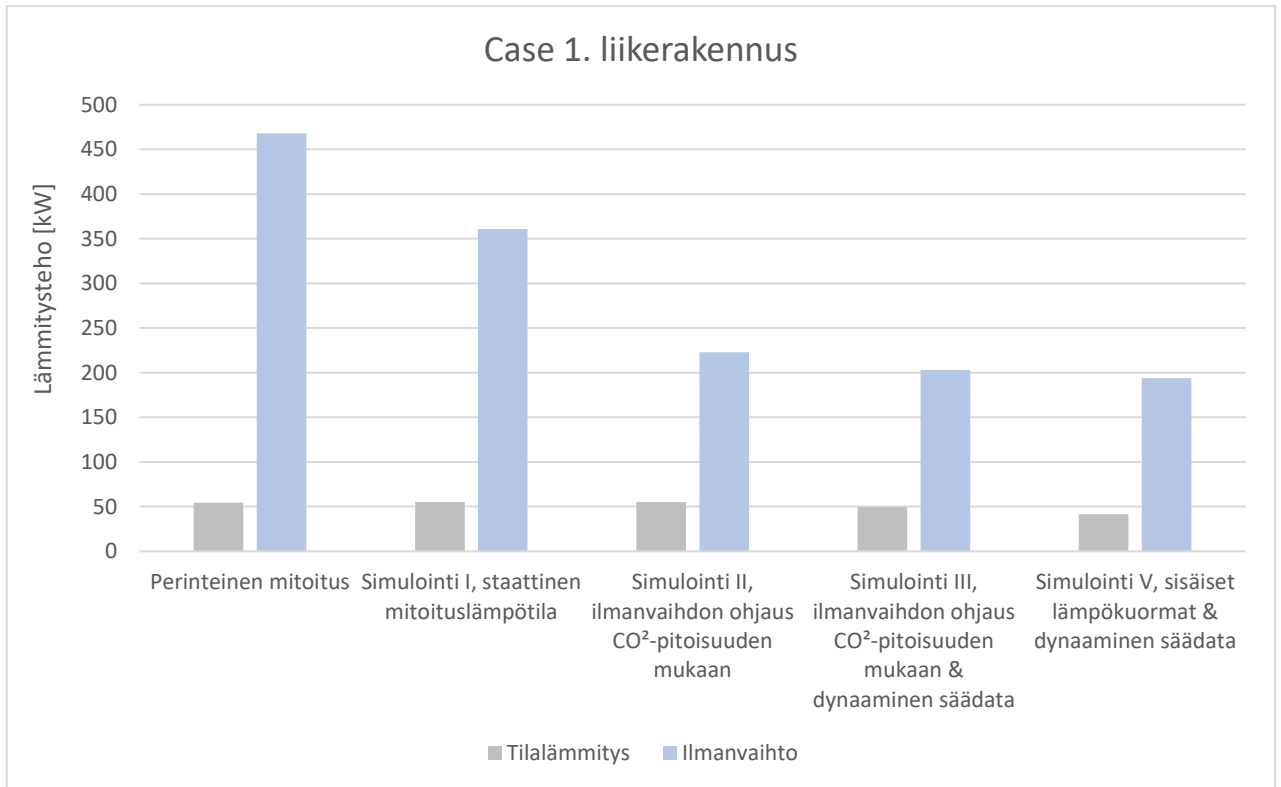
### 4.1 Lämmitysteho

Ensimmäinen lämmitystehon simulointi toteutetaan mukailleen mahdollisimman paljon perinteistä lämmitystehon mitoitusta. Eroavaisuuksia lämmitystehoihin tekevät esimerkiksi muuntojoustavuuden, ylimitoituksen sekä ilmanvaihtopattereiden limityksien aiheuttamat

lämmitystehoerot. Simulointi I kokonaistehoissa on huomioitu oviverhokoneiden yhdenaikaisuus. Liikerakennuksessa sekä hybridirakennuksessa oletuksena on 55% ovista olevan samalla hetkellä käytössä, ja opetusrakennuksessa 2/3. Opetusrakennuksessa sijaitsee 3 pääovea, ja mitoituksessa arvioidaan kahden kolmesta olevaan samaan aikaan auki.

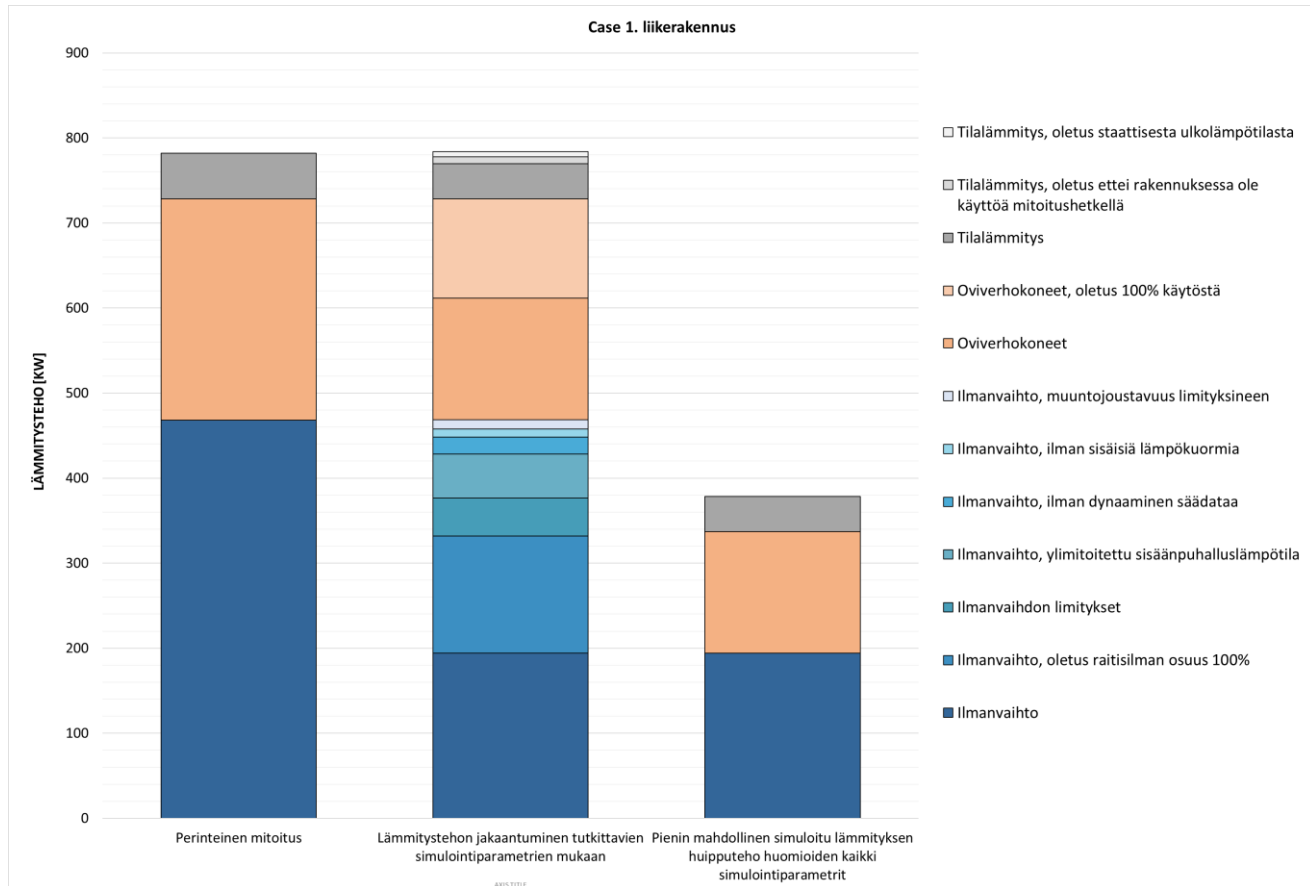
Kuvassa 14. on esitetty liikerakennuksen lämmitystehosimulointien tulokset. Suurin mitoitustehon pudotus tapahtuu kahdessa ensimmäisessä simuloinnissa. Ensimmäisessä simuloinnissa matalampi tuloilman lämpötilantarve, ilmanvaihtopattereiden limitykset sekä muuntojoustavuus tiputtavat vaadittavaa ilmanvaihdon tehontarvetta neljänneksen. Matalampi sisäänpuhalluslämpötila selittyy sillä, että oletettavasti perinteisessä mitoituksessa on sisäänpuhalluslämpötila määritelty tietyn vakioidun arvon mukaisesti, ei laskemalla tarkasti tilojen lämpöhäviöiden mukaisesti.

Ensimmäisen simuloinnin sekä perinteisen mitoituksen lämmitystehot ovat tilalämmityksen osalta vastaavat. Simuloinnissa II on otettu huomioon palautuspeltien ohjaus hiilidioksidipitoisuuden mukaan, ja tällöin ilmanvaihdon osalta lämmitysteho pienenee kaikista eniten, reilun neljänneksen edelliseen simulointiin verrattuna. Tehon laskemisen syynä on vähempi raitisilman tarve, jolloin voidaan hyödyntää enemmän kiertoilmaa silti pysyttäessä vaadituissa hiilidioksidipitoisuuksissa. Tilalämmityksen tehontarve pysyy stabiilina. Kolmannessa simuloinnissa simulointi tehdään testisäädäntä mukaisesti dynaamisesti, jolloin mittausajanjaksolle asettuu yksi 24 tunnin mittainen mitoitussäätöolosuhteiden mukainen  $-26\text{ °C}$  lämpötila. Dynaamisen säädäntä vaikutus laskee kymmenyksen ilmanvaihdon sekä tilalämmityksen lämmitystehontarvetta. Dynaamisen säädäntä sekä 100% lämpökuormien huomiointi viimeisessä simuloinnissa laskee tilalämmityksen tehontarvetta vajaan viidenneksen ja ilmanvaihdon 5%. Liikerakennuksessa on tutkittu tarkemmin henkilötiheyden muutoksia lämmitystehtoon kappaleessa 4.1.1 sekä palautusilmakoneiden toimintaa kappaleessa 4.1.2.



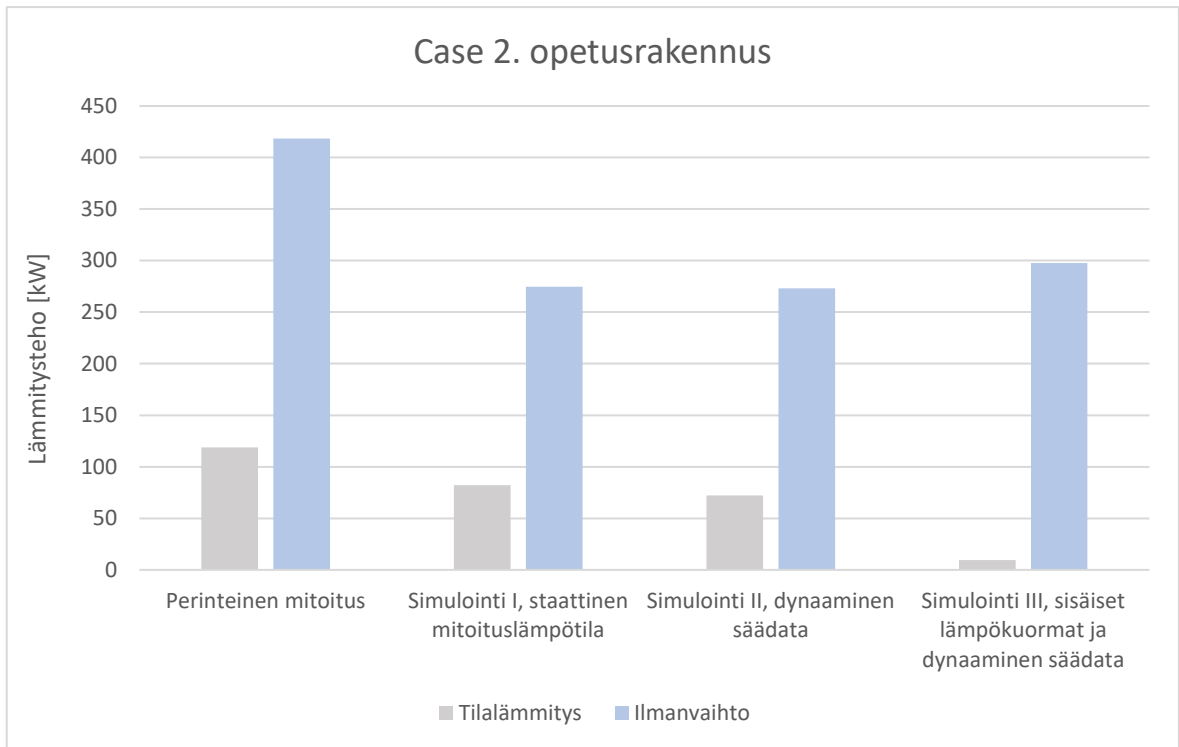
**Kuva 14.** Liikerakennuksen lämmitystehojen simuloinnit.

Kuvassa 15. on esitetty kunkin tutkittavan parametrin vaikutus lämmitystehtoon. Taulukoinnin ajatuksena on esittää visuaalisesti miten suuri muutos tilälämmityksen, ilmanvaihdon sekä oviverhokoneiden parametreilla on. Liikerakennuksessa tilälämmityksen osuus on melko suhteessa kokonaistehontarpeeseen; lämpökuormien ja dynaamisen säädädata huomioiminen laskee lämmitystehtotarvetta enimmillään neljänneksen. Oviverhokoneita ei oteta huomioon simuloinnissa, mutta tuloksissa otetaan huomioon 55% yhdenaikaisuuskerroin, jolloin oletetaan viiden yhdeksästä ovesta olevan käytössä samanaikaisesti. Ilmanvaihdon lämmitystehton osalta olennaisimpia parametreja ovat ilmanvaihdon limitykset, palautusilman käyttö sekä matalampi sisään puhallettava lämpötila. Kuvassa 15. on lämpökuormat huomioitu ainoastaan simulooidessa ne dynaamisen säädädata kanssa.



**Kuva 15.** Liikerakennuksen lämmitystehon jakaantuminen tutkittavien simulointiparametrien mukaan.

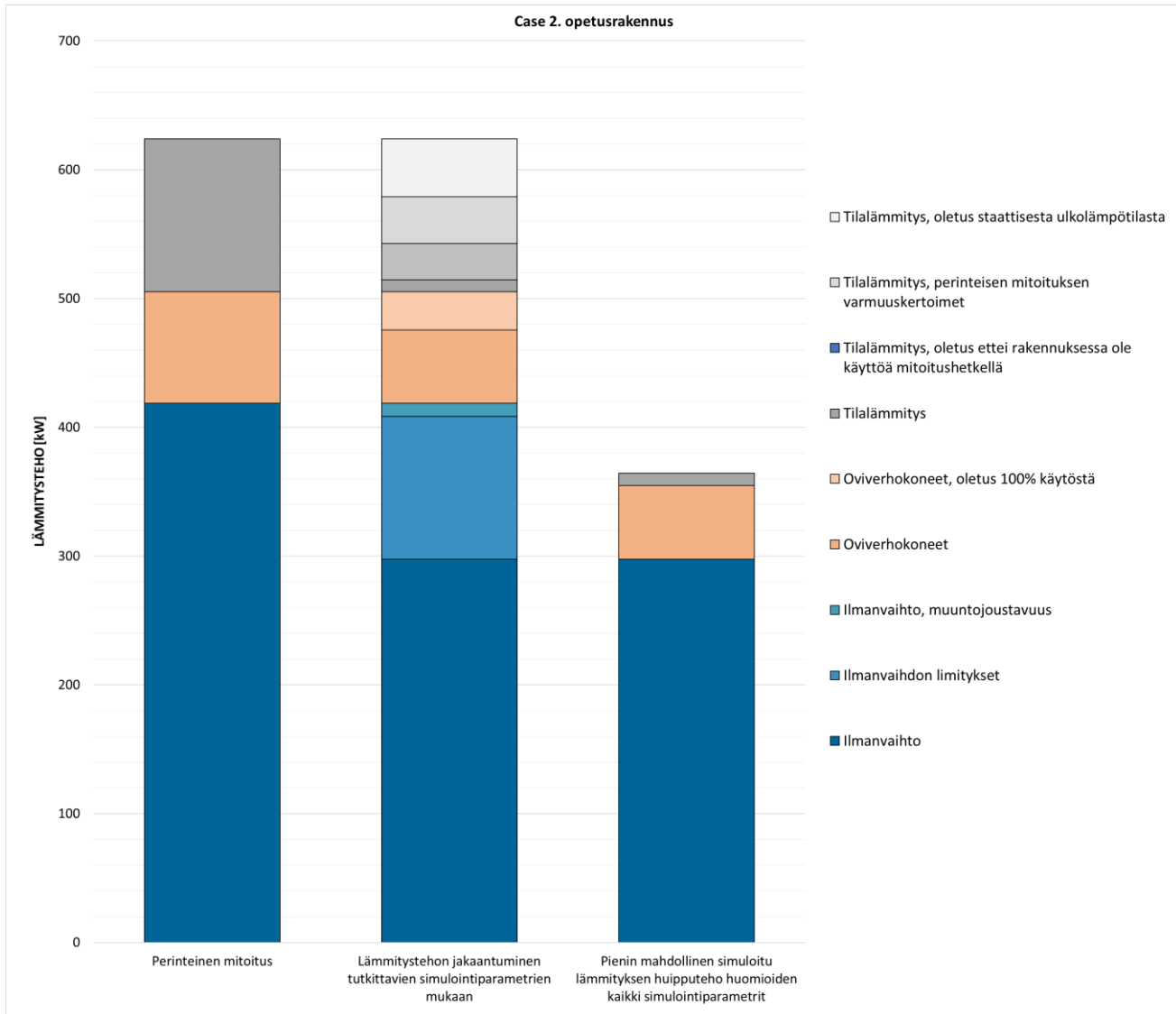
Opetusrakennuksessa suurin osa opetustiloista on toteutettu ilmamääräsäädöllä, eli ilmanvaihtoa ohjataan tilan hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Suurin muutos lämmitystehoissa tapahtuu ensimmäisessä simuloinnissa, jossa huomioidaan ilmamääräsäätö ja koululle laadittu käyttöprofiili. Tällöin ilmanvaihdon sekä tilalämmityksen lämmitystehontarve on puolet pienempi. Lämmitystehon pudotus johtuu ilmanvaihdon limityksien, muuntojoustavuuden sekä ilmamääräsäädön vaikutuksesta. Dynaamisen testisäädän käyttö vaikutus ilmanvaihdon huipputehoon on merkityksetön, mutta lämpökuormien huomioiminen nostaa ilmanvaihdon lämmitystehoa kymmenyksen simulointiin II verrattuna. Tilalämmityksen tehontarve puolestaan laskee simuloinneissa melko lineaarisesti ollen vain kymmenyksen huomioidessa lämpökuormat sekä dynaaminen säädädata. Verrattuna alkuperäiseen mitoitukseen ilmanvaihdon mitoitus-teho on kolmanneksen pienempi huomioidessa dynaaminen testisäädädata sekä lämpökuormat. Ilmamääräsäädön vaikutusta lämmitystehontarpeeseen on tarkasteltu yksityiskohtaisemmin kappaleessa 4.1.3.



**Kuva 16.** Opetusrakennuksen lämmitystehojen simuloinnit.

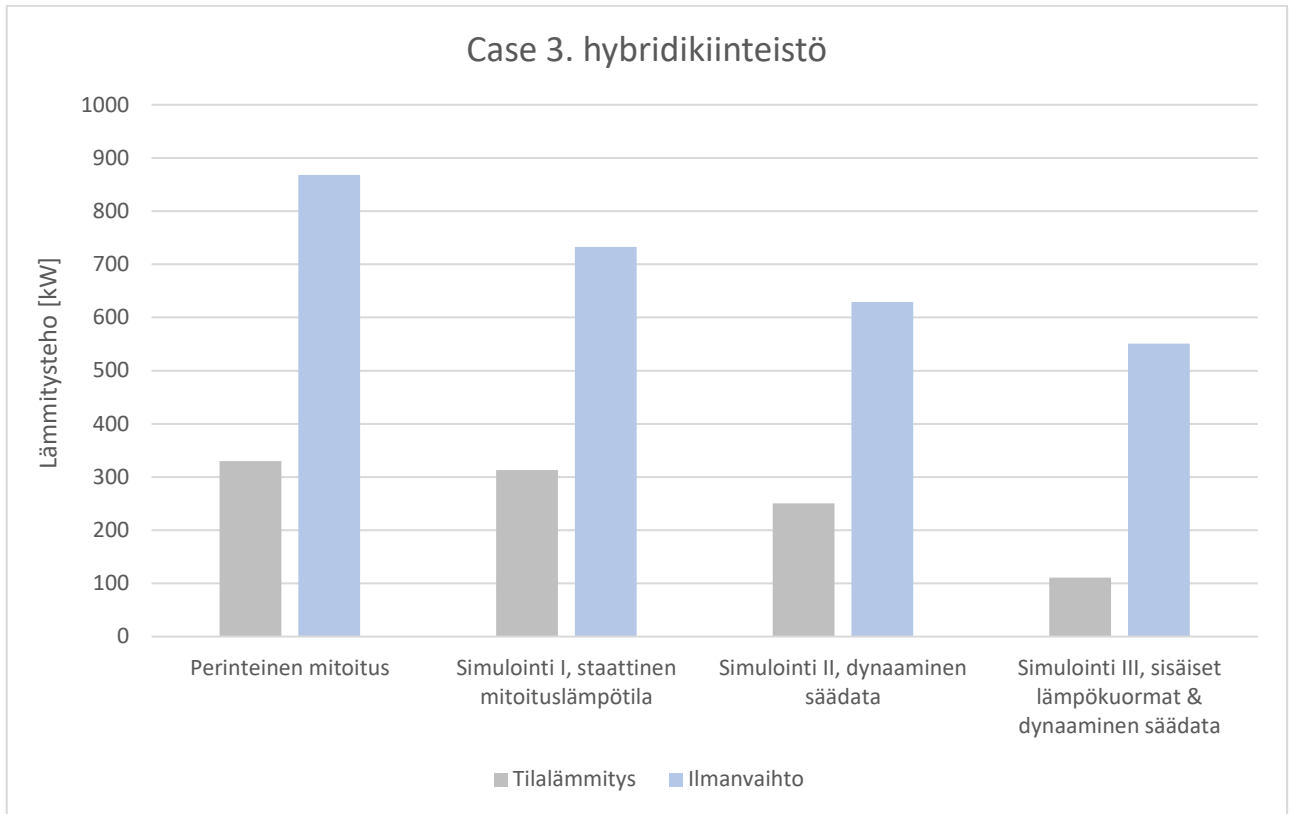
Kuvassa 17. on esitetty opetusrakennuksen lämmitystehtoon vaikuttavia parametreja. Taulukon ajatus on esittää parametrit säästöpotentiaalın näkökulmasta, ja tämän takia matalin ilmanvaihdon lämmitystehtoa on ilmoitettu lämpökuormien ja dynaamisen testisäädä huomioon ottaen. Ilmamääräsäätö nostaa ilmanvaihdon lämmitystehtotarvetta huomioidessa lämpökuormat. Opetusrakennuksen tilanteessa lämpökuormien huomioiminen nostaa matalinta lämmitystehtoa, jolloin näiden parametrien huomioon ottaminen nostattaa kokonaislämmitystehtoa. Tilälämmityksen osalta huomioiden dynaaminen testisäädä ja lämpökuormat laskevat melko rajusti vaadittavaa lämmitystehtoa. Opetusrakennuksessa sisäänkäyntejä on yhteensä 3, ja kuvassa 17. on arvioitu lämmitystehtoa säästöpotentiaalın, mikäli näistä ovista on käytössä 2/3.





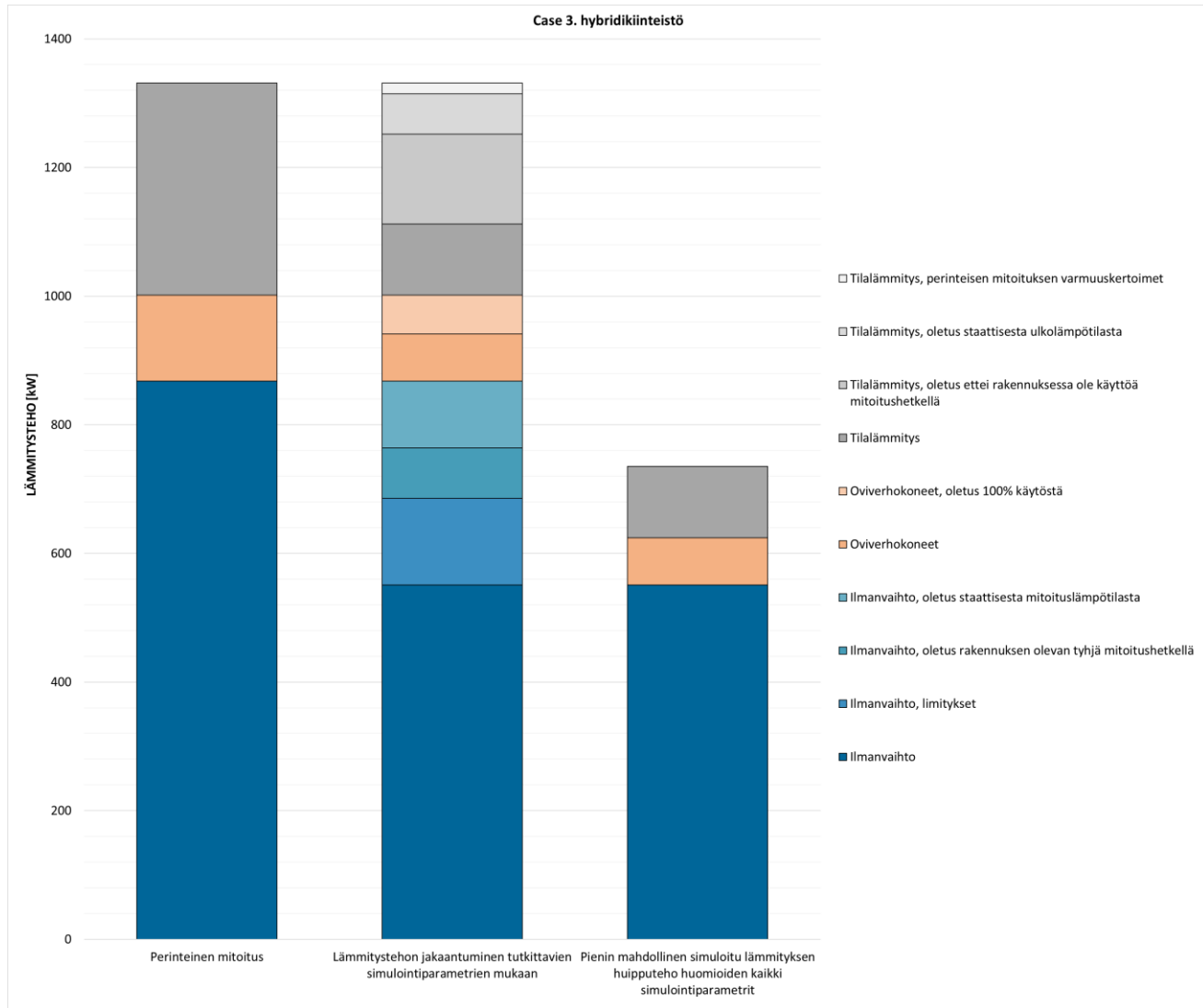
**Kuva 17.** Opetusrakennuksen lämmitystehon jakaantuminen tutkittavien parametrien mukaan.

Hybridikiinteistön lämmitystehontarpeet niin ilmanvaihdon kuin tilalämmityksen osalta laskevat lineaarisimmin simulointien välillä kuten kuvassa 18. huomataan. Tilalämmityksen osalta lämpökuormien huomioiminen tekee suurimman pudotuksen huipputehoon. Kokonaisuudessaan kaikki parametrit huomioiden tilalämmityksen tehontarve laskee 2/3 ja ilmanvaihdon reilun kolmanneksen.



**Kuva 18.** Hybridirakennuksen lämmitystehojen simuloinnit.

Kuvassa 19. on esitetty hybridikiinteistön simuloinneissa havaittujen parametrien vaikutusta. Ilmanvaihdon osalta kaikilla parametreilla on aika tasainen vaikutus tehontarpeeseen. Tilalämmityksessä lämpökuormien ja dynaamisen testisäädätin huomioiminen tekee suurimman vaikutuksen simulointituloksiin. Oviverhokoneille, joita rakennuksessa on yhteensä 20 kappaletta, arvioidaan 55% yhdenaikaisuuskerroin.

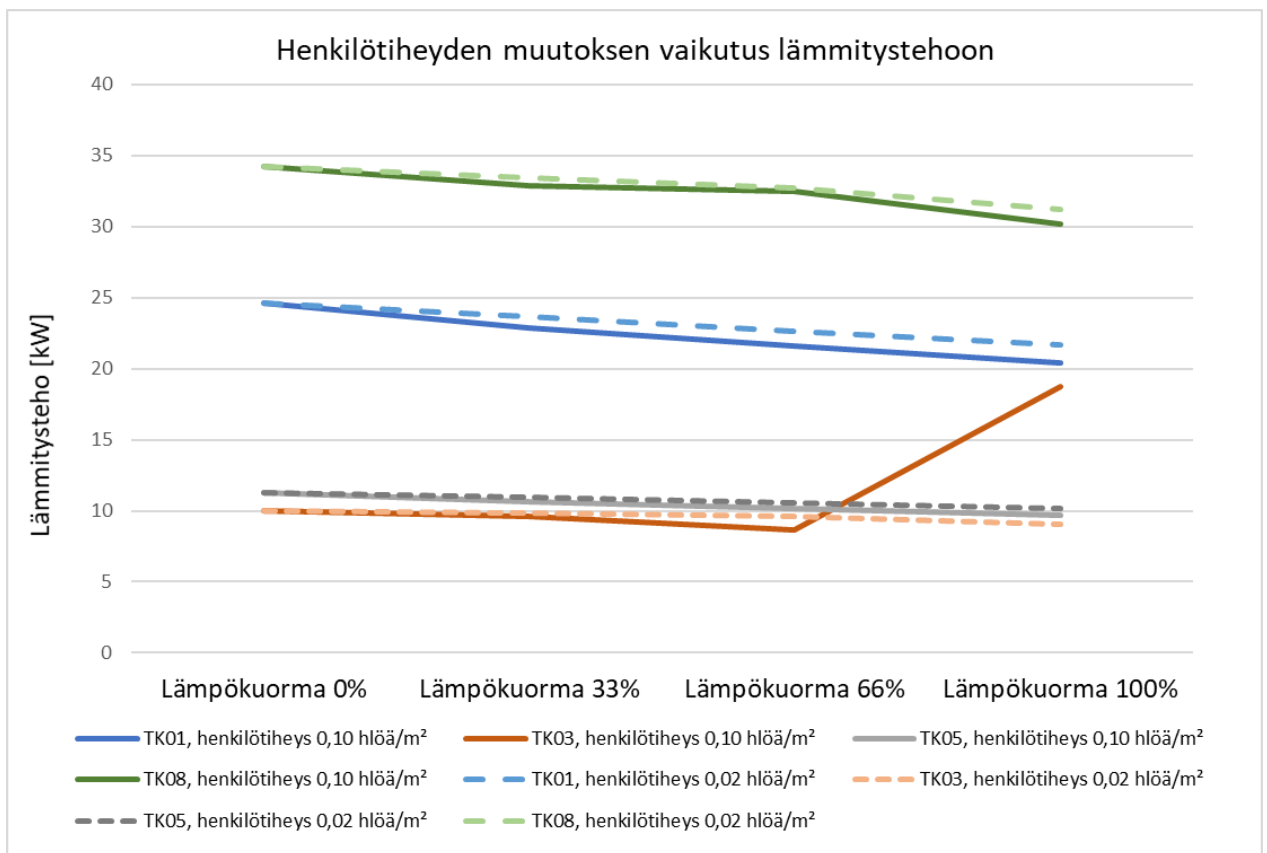


Kuva 19. Hybridirakennuksen lämmitystehon jakaantuminen tutkittavien parametrien mukaan.

#### 4.1.1 Henkilötiheyden vaikutus lämmitystehontarpeeseen

Henkilötiheyden muutoksen vaikutusta lämmitystehontarpeeseen tutkitaan liikerakennuksessa palvelualueittain. Suomen Rakentamismääräyskokoelma ja Sisäilmastoluokituksen 2018 mukaiset henkilötiheydet eroavat toisistaan, joten tutkitaan miten suuri vaikutus lämmitystehontarpeeseen, on henkilötiheyden muutoksella. Kuvassa 20. on esitetty palvelualueittain henkilötiheyksillä 0,1 hlöä/m<sup>2</sup> sekä 0,02 hlöä/m<sup>2</sup> lämmitystehon muutokset. TK01, TK05 sekä TK08 palvelevat tavanomaisia liiketiloja, ja TK03 palvelee liikunta- sekä kuntosalitiloja. Kuntosali –ja liikuntatilojen osalta henkilötiheydellä on kriittisempi merkitys.

Kuntosalin palvelualue poikkeaa muista tuloksista, ihmisen aktiivisuustaso on määritelty korkeammaksi ja hiilidioksidin suuremman pitoisuuden vuoksi vaaditaan raitista ilmaa tiloissa enemmän ja kiertoilmaa voidaan hyödyntää vähemmän. Kuntosalitilojen aktiviteettitaso on muita liiketiloja korkeampi, ja raitisilman tarve kasvaa suhteessa muihin tiloihin nähden korkeammaksi samalla henkilötiheydellä. Lämpökuormien 100% huomiointi suuremmalla henkilötiheydellä (0,1 hlöä/m<sup>2</sup>) aiheuttaa tehopiikin vaadittavassa lämmitystehossa.

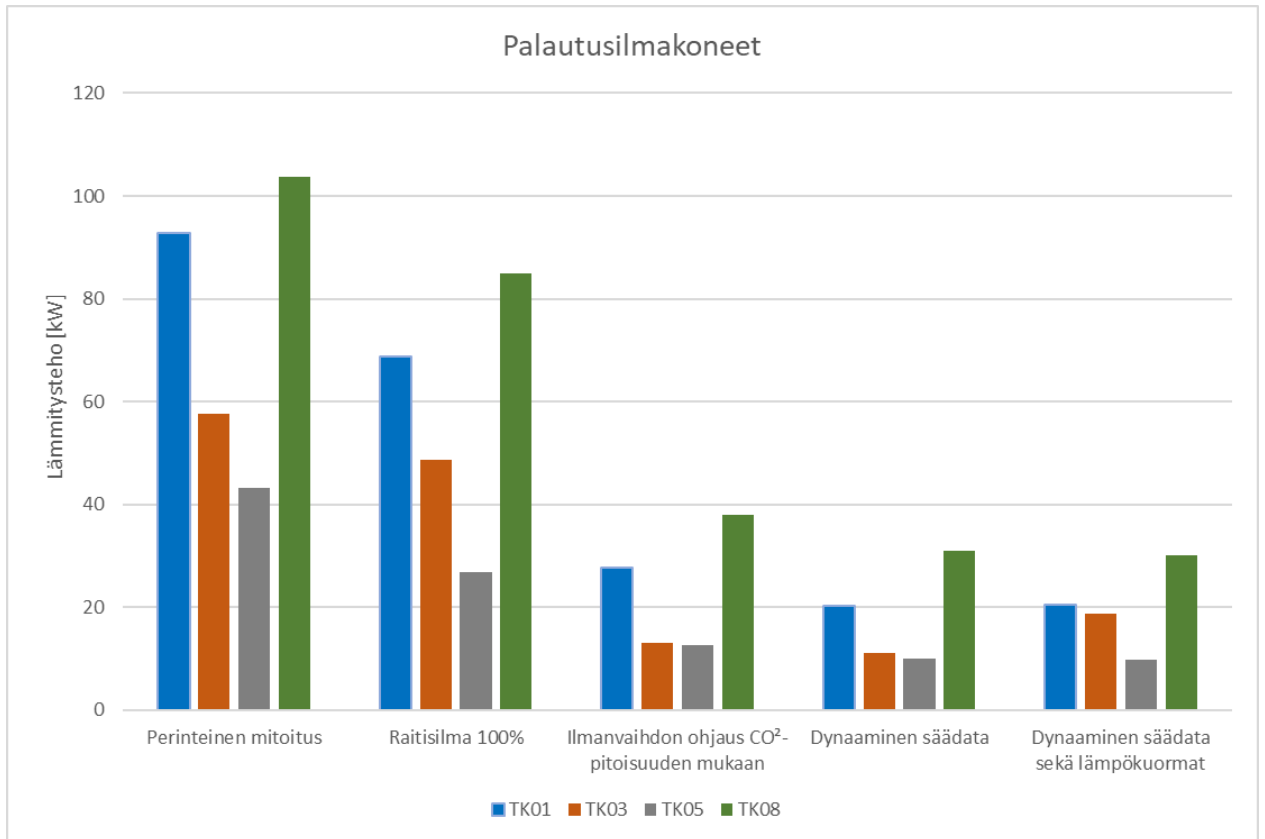


**Kuva 20.** Henkilötiheyden muutoksen vaikutus lämmitystehoon palvelualueittain.

#### 4.1.2 Palautusilmakoneiden lämmitystehontarve

Palautusilmakoneet palvelevat ilmalämmitteisiä tiloja, ja ilmanvaihtokone hyödyntää kiertäykseen palautusilmaa huonetilasta ohjaten kiertoilmapeltejä tilojen hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Tutkittavissa simuloinneissa kierrätysilman osuudeksi on määritelty 0-85%. Palautusilmakoneen kiertoilman määrää ohjaa tilojen hiilioksidipitoisuus, joka

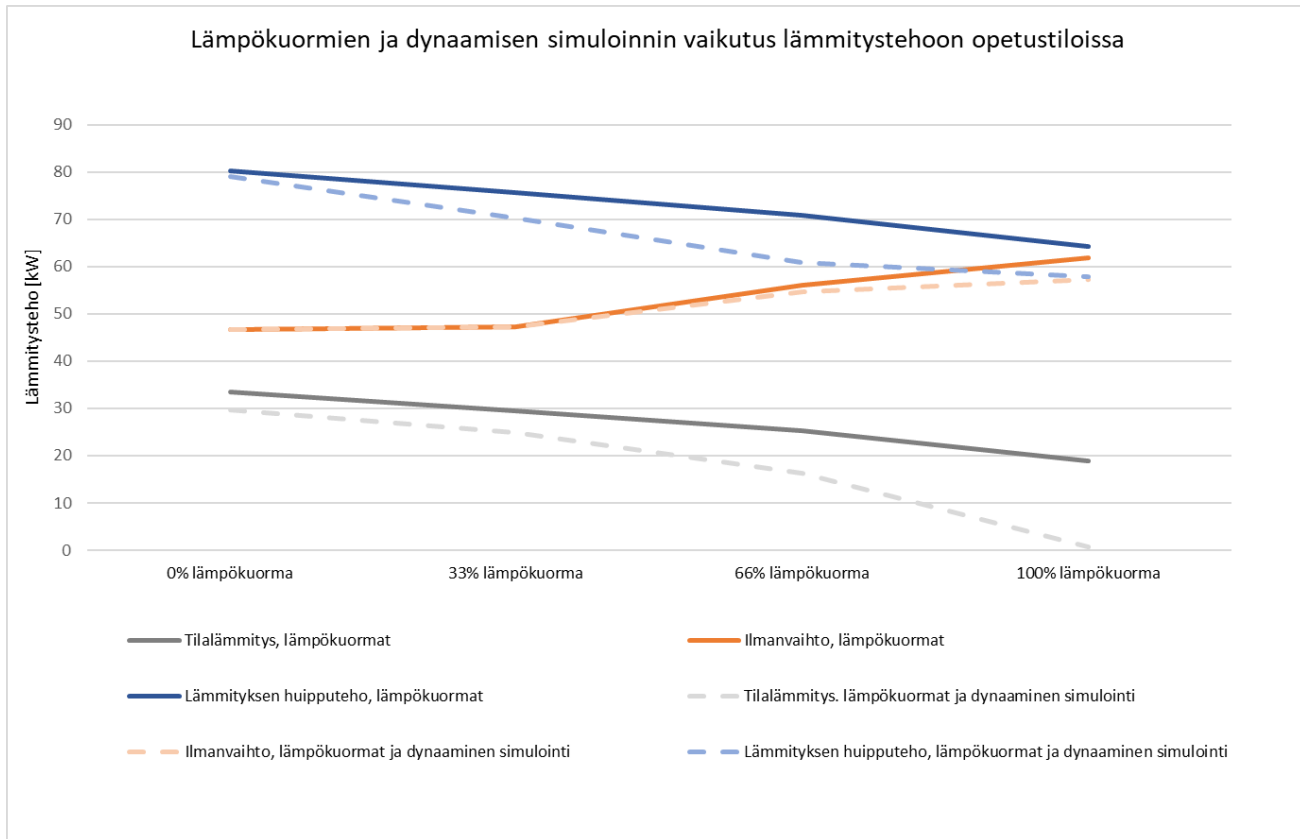
korkeimmillaan saa nousta simuloinneissa 950 ppm. Palautusilman käyttö vähentää lämmitystehontarvetta verrattuna tilanteeseen, jossa 100% tuloilmasta olisi lämmitettävä haluttuun sisäilman lämpötilaan. Ilmalämmityksen mitoituslämpötilaksi on alkuperäisissä suunnitelmissa mitoitettu 28 °C. Kuvassa 21. on esitetty palautusilmakoneille tehdyt simuloinnit. Ensimmäinen lämmitystehon simulointi toteutettiin mahdollisimman lähelle perinteistä mitoitusta, eikä tällöin otettu huomioon ilman kierrätystä. Ensimmäisessä mitoituksessa ilmanvaihtokoneiden yhteenlaskettu lämmitysteho laski neljänneksen. Suhteellisen suuri lämmitystehon lasku selittyi ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden limityksillä, ja tilan lämmitys ei vaatinut ilmanvaihdolta staattisessa ulkoilman mitoituslämpötilassa mitoitettua 28 °C sisään puhallettavaa lämpötilaa, vaan korkeimmillaan lämpötila suunnitelmien mukaisilla ilmamäärillä oli 23 °C. Hiilidioksidipitoisuuden mukaan ohjautuvien kiertopeltien huomioiminen simuloinnissa laskee kokonaislämmitystehoa ilmanvaihtokoneilta jopa 60%. Tilan hiilidioksidipitoisuuden hallintaan ja pysymiseen halutuissa raja-arvoissa vaatii 15% raitista ilmaa. Lisäksi myös kosteuden ja muiden epäpuhtauksien hallinta voi tarpeen mukaisesti vaatia enemmän raitista ilmaa, mutta näitä tekijöitä ei ole huomioitu tämän diplomityön puitteissa. Huomioidessa dynaaminen säädata, lämmitystehontarve laskee viidenneksen. Simuloidessa ottaen huomioon kaikki edellä mainitut parametrit sekä lämpökuormat, tilojen lämmitysteho nousee edelliseen simulointiin nähden 10%. Lämmitystehon nousu johtuu liikunta- ja kuntosalitilojen kasvaneesta tehontarpeesta. Palautusilmakoneiden huipputehontarve on määritelty ilmanvaihtokonekohtaisesti, jolloin niiden lämmitystehohuiput eivät välttämättä ajoitu samalle hetkelle.



**Kuva 21.** Palautusilmakoneiden lämmitystehehojen muutokset simulointien mukaan.

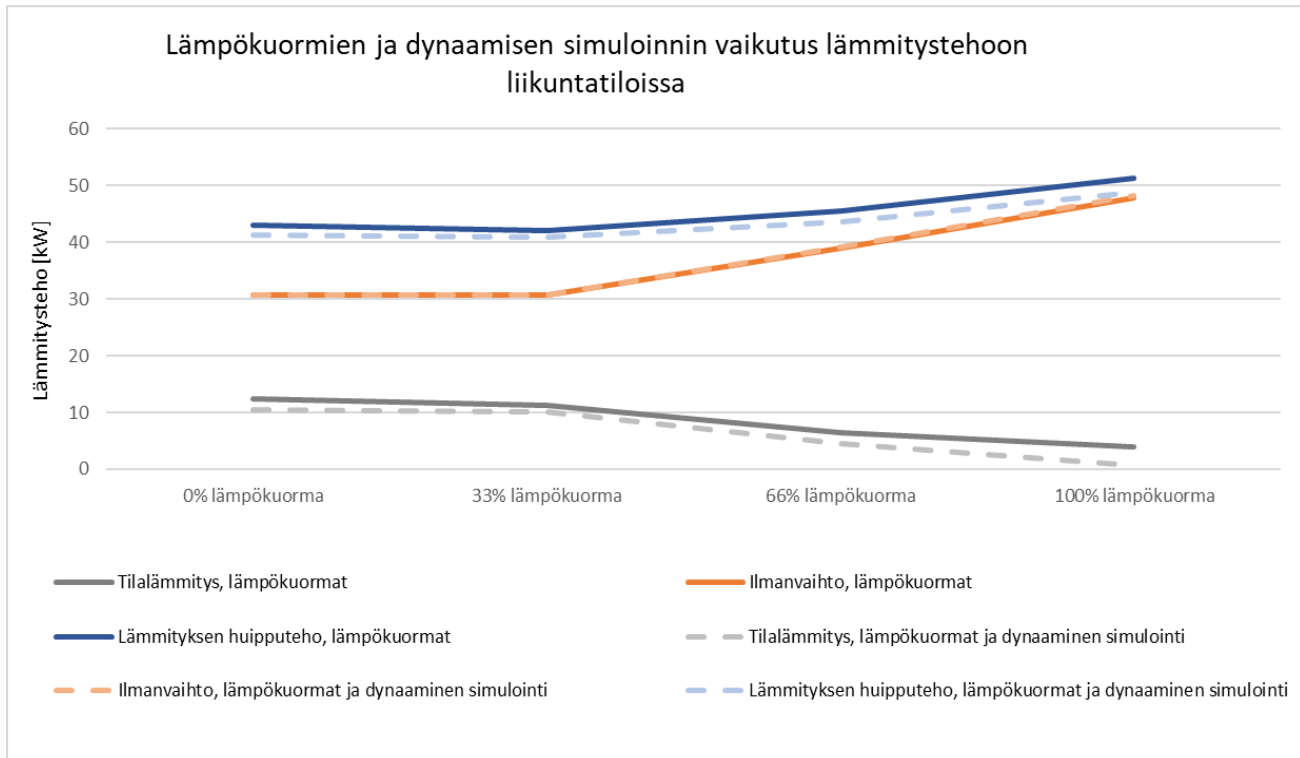
#### 4.1.3 Ilmamääräsäätö (IMS)

Opetuskiinteistössä opetustilojen palvelualueella ainoastaan lämpökuormat huomioidessa kokonaishuipputeho laskee viidenneksen. Säästöpotentiaali koostuu lähinnä tilalämmityksestä, jonka osuus laskee lähes puoleen. Ilmanvaihdon lämmitystehontarve kasvaa kolmanneksen. Huomioitavaa on, että ilmanvaihdon sekä tilalämmityksen huipputehot eivät toteudu yhtenäkkäisesti, jolloin huipputehoissa on huomioitu korkein hetkellinen lämmitystehontarve. Lämpökuormat sekä dynaaminen simulointi huomioiden lämmitysteheho laskee kokonaisuudessaan neljänneksen. Sisäisten lämpökuormien huomioiminen poistaa tilalämmityksen tarpeen kokonaan, mutta ilmanvaihdon lämmitystehontarve kasvaa neljänneksen. Tulokset ovat esitetty kokonaisuudessaan kuvassa 22.



**Kuva 22.** Opetustilojen lämpökuormien vaikutus lämmitystehoon.

Liikuntatiloissa ihmisten metaboliseksi ekvivalenttisarvoksi on määritelty 5, sillä oletetaan liikuntatiloissa lämmönluovutuksen olevan suurempi kuin muissa opetustiloissa, joissa oleskelu on staattisempaa. Lämpökuormat huomioidessa liikuntatiloissa suuremman hiilidioksidipitoisuuden takia raitisilman suurempi määrä nostattaa lämmitystehoa 55%. Tilalämmityksen tehontarve laskee lähes 70%, mutta kokonaisuudessaan lämmitysteho kasvaa neljänneksen. Dynaaminen simulointi ja lämpökuormat nostaa ilmanvaihdon lämmitystehoa lähes 60% tilalämmityksen tehontarpeen ollessa lähes olematon. Kokonaisuudessaan lämmitysteho kasvaa viidenneksen. Simulointitulokset esitetty seuraavassa kuvassa 23.



**Kuva 23.** Liikuntatilojen lämpökuormien vaikutus lämmitystehteen.

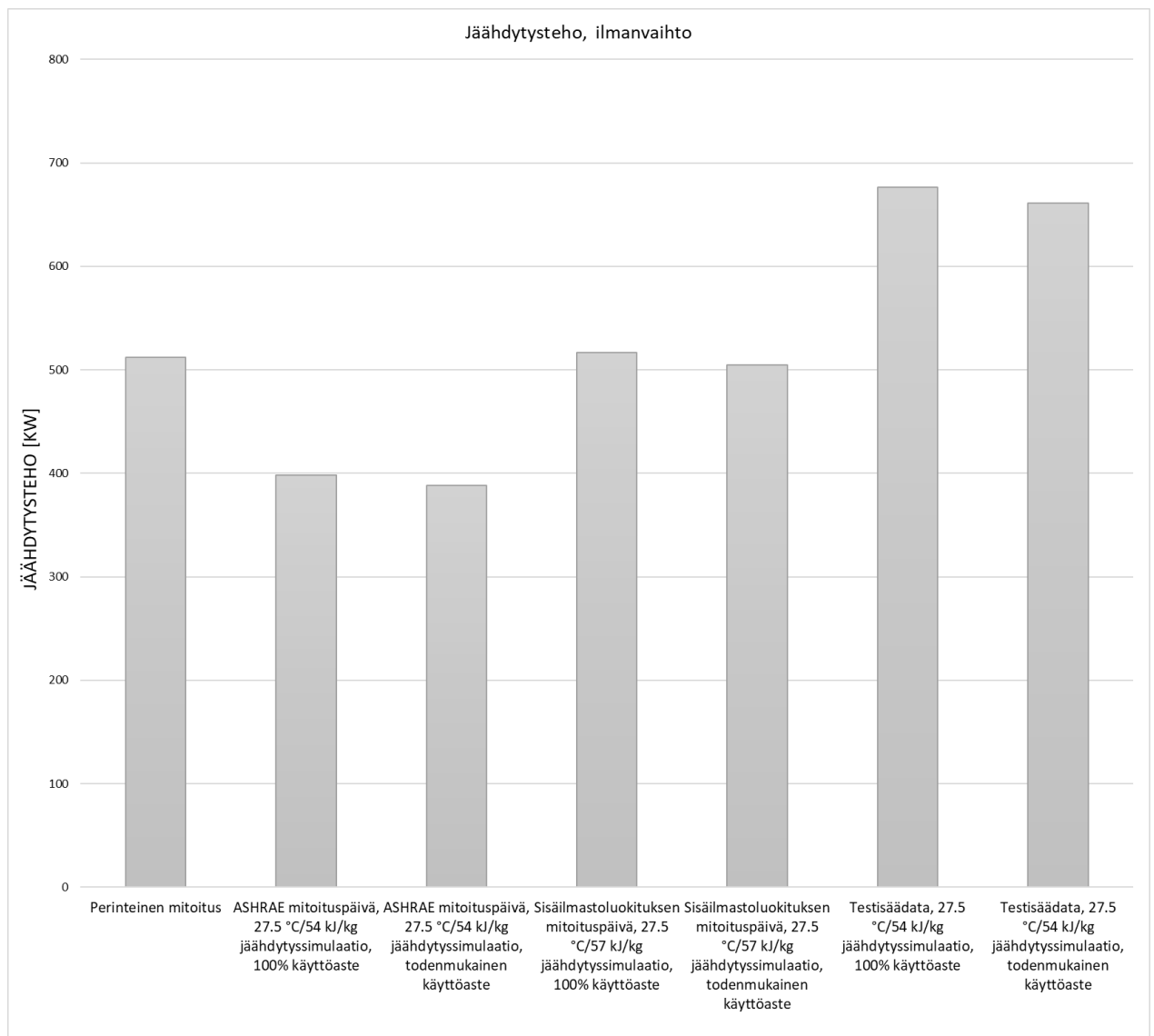
## 4.2 Jäähdytysteho

Jäähdytyksen osalta vaadittavaan huipputehteen vaikuttaa oleellisesti ulkoilman mitoitettava entalpia, sillä eri simulointien välillä havaittiin jopa yli 40% ero vertailtaessa kokonaisjäähdytystehoja. Pienin mahdollinen jäähdytysteho saadaan simuloimalla energiasimulointiohjelman oletusmitoituspäivän mukaan, ja käytettäessä todennukaista käyttöprofiilia. Suurin mitoitusteho saadaan simuloimalla testisäädätällä, ja käyttöasteen ollessa jatkuvasti 100%.

Ilmanvaihdon jäähdytystehoon ei käyttöprofiilin ja 100% käyttöasteen välillä ole havaittavissa merkittäviä eroavaisuuksia. Suurimmat erot tulevat juuri eri simulointimenetelmien välillä; pienen jäähdytysteho saadaan energiasimulointiohjelmiston ASHRAE:n mitoituksen mukaisella mitoituspäivällä, ja suurin teho testisäädätällä. Sisäilmastoluokituksen sekä perinteisen mitoituksen välillä ei ole eroavaisuuksia, mikä selittyy identtisillä mitoituskriteereillä. Ilmanvaihdon jäähdytystehon osalta olennaiseen rooliin tulee ilmanvaihdon

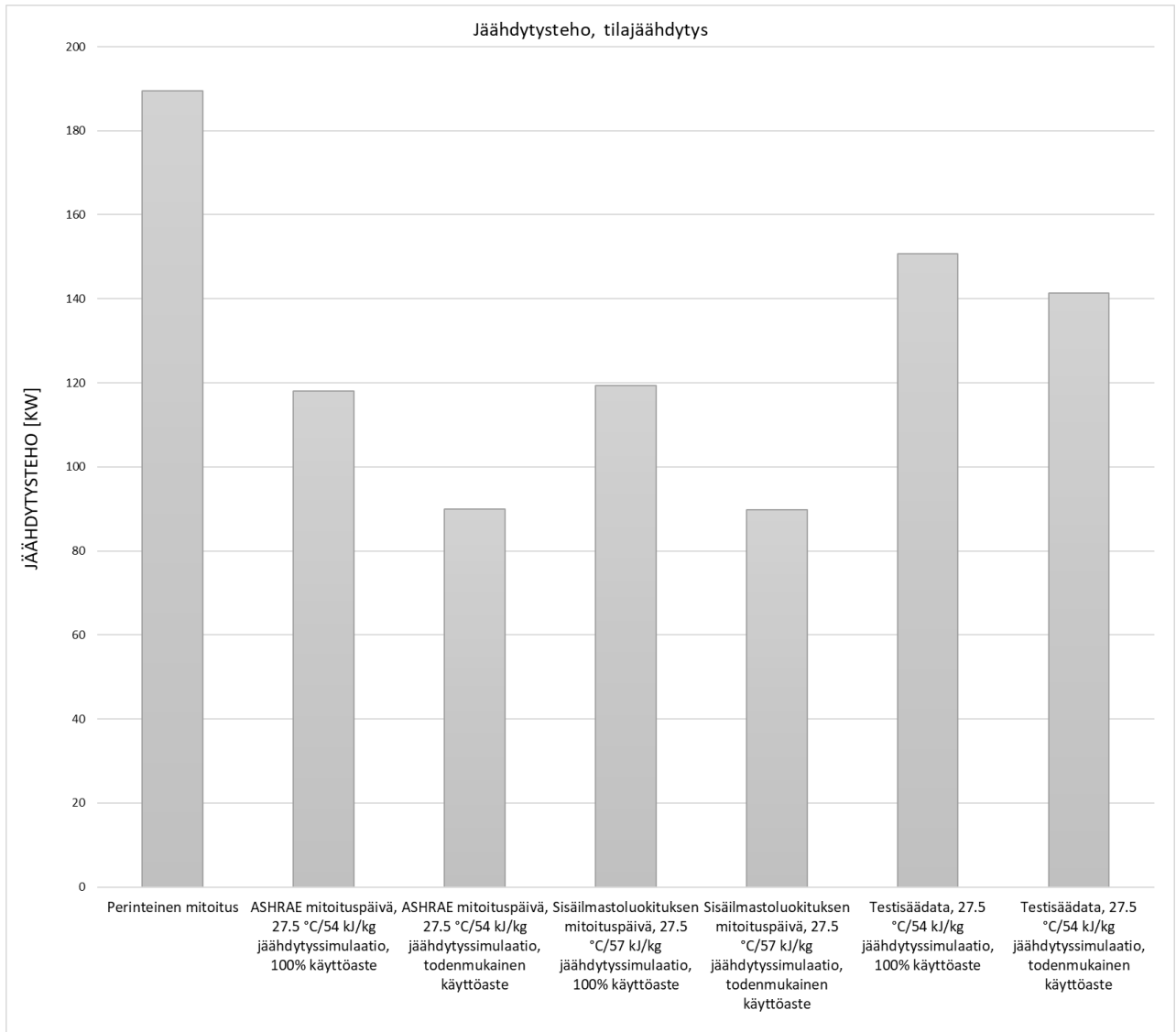


jäähdytyspatterin mitoitusolosuhteet, millaiset olosuhteet oletetaan kesällä olevan ja millaisiksi olosuhteet tuloilman osalta määritellään. Kuvassa 24. on esitetty ilmanvaihdon jäähdytystehon simulointiperiaatteen mukaan. Sisäilmastoluokituksen ja ASHRAE:n mukaisien mitoituskriteerien välillä on eroa ainoastaan entalpiassa, joka selittää eroavaisuudet ilmanvaihtokoneen jäähdytystehomitoituksien välillä. Tämä vaikuttaa ilmanvaihdon jäähdytystehoon, mutta sillä ei ole merkitystä tilajäähdytykseen.



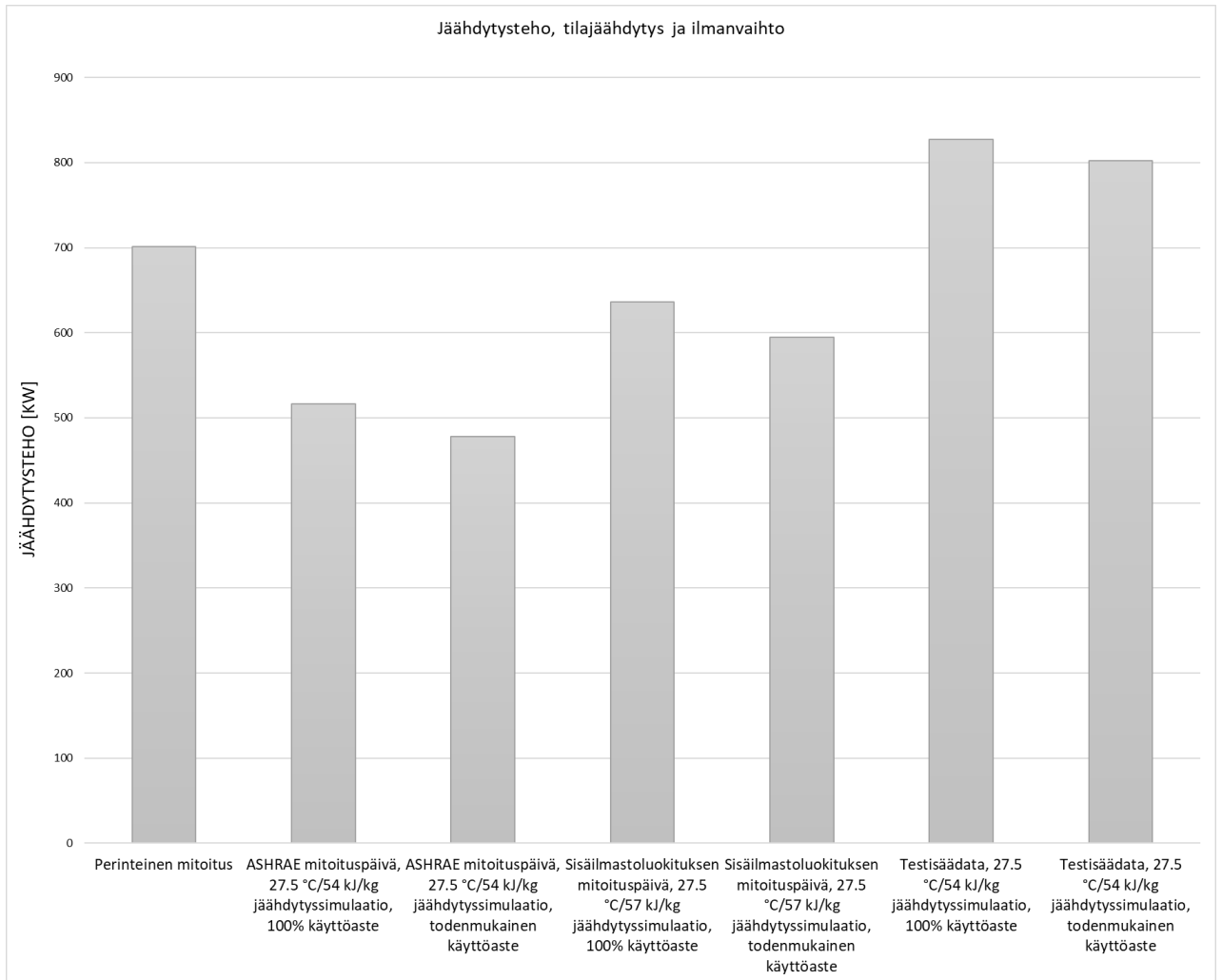
**Kuva 24.** Jäähdytysmullaoinnin vaikutus ilmanvaihdon jäähdytystehoon

Käyttöprofiilin huomioiminen näkyy selkeimmin tilajäähdytystehoissa, kun tiloissa ei ole käytössä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Todenmukainen käyttöprofiili on pienentänyt tilajäähdytyksen simuloitua jäähdytystehoa enimmillään neljänneksen, joka toteutui sekä energiasimuloinnin AHSRAE:n mitoituspäivän, että Sisäilmastoluokituksen mukaisen mitoituspäivän simuloinneissa. Kuvassa 25. on esitetty tilakohtaiset jäähdytystehot simulointimenetelmittäin. Perinteinen mitoitus tilajäähdytyksen osalta tarkoittaa alkuperäisien LVI-suunnitelmien mukaista mitoitusta, ja tähän verrattuna jokainen simuloitu tilajäähdytysteho on huomattavasti pienempi simuloinnissa huomioidun yhdenaikaisuuden vuoksi.



**Kuva 25.** Jäähdytys­simulointiperiaatteen vaikutus tilajäähdytyksen huipputehoon

Rakennuksen kokonaisjäähdytystehot ovat esitetty simuloinneittain kuvassa 26. Todenmukaisen käyttöasteen huomioimisen merkitys on melko vähäinen. Samoilla mitoitus­kriteereillä todenmukainen käyttöaste laskee jäähdytyksen kokonaistehontarvetta enimmillään kymmenyksen. Suurin ero havaitaan ASHRAE:n oletusmitoituksella ja testisäädädata­n avulla simuloituissa jäähdytystehoissa, jolloin ero simuloitujen tehojen välillä on enimmillään 40%.



**Kuva 26.** Jäähdytys­simulointiperiaatteen vaikutus jäähdytystehoon kokonaisuudessaan.

## 5 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI

### 5.1 Simuloinnin kannalta olennaiset laskentaparametrit

Lämmitystehon simuloinneissa on olennaista huomioida tilojen käyttö ja ilmanvaihdon toiminta. Perinteisessä mitoituksessa tilalämmityksen oksalta rakennus mitoitetaan huomioidmatta lämpökuormia, eli toisin sanoen rakennus on tällöin tyhjä. Samanaikaisesti kuitenkin ilmanvaihdon lämmityksen huipputeho mitoitetaan oletuksella, että rakennus on täydellä käytöllä. Tämä ristiriita on erityisen suuri rakennuksissa, joissa ilmanvaihto on toteutettu tarpeenmukaisella ilmanvaihdon säädöllä. Lämmitysjärjestelmän mitoitus-teho lasketaan laskemalla kaikki tehot yhteen, ja tällöin on selkeä ristiriita rakennuksen käytön osalta sekä aiheuttaa melko hallitsemattoman varmuuskertoimen kokonaismitoitustehoon. Simuloimissa lämmitystehoja vastaavaa ristiriitaa ei synny. Simuloinnin avulla on mahdollista saada lämmöntuotantojärjestelmien mitoitusprosessista hallitumpi perinteiseen menetelmään verrattuna.

Liikunta- ja kuntosalitiloissa ihmisten hiilidioksidintuotto lisää ilmanvaihdon lämmitystehontarvetta huomioidessa ihmisten, laitteiden ja valaistuksen aiheuttamat lämpökuormat. Ilmalämmitteisten tilojen palautusilmakoneiden lämmitystehon mitoituksessa on suuri säästöpotentiaali, sillä näiden ilmanvaihtopatterit olisi simulointikohteessamme voitu mitoittaa keskimäärin 5 °C matalammalle tuloilman lämpötilalle. Myymälätilojen palautusilman hyödyntämisessä on merkittävä säästöpotentiaali, mutta epäpuhtauskuormat voivat vaatia tapauskohtaisesti suurempaa ilmamäärää. Ilmamääräsäätöisissä tiloissa on huomioitava lämpökuormat ja niiden vaikutus lämmitystehoon.

Muuntojoustavuuteen varautuminen voi johtaa järjestelmän ylimitoitamiseen. Tutkittavissa kohteissa muuntojoustavuuden osuus kokonaislämmitystehoja tarkastellessa on kuitenkin melko merkityksetön.

Jäähdytystehon määrittämiseen vaikuttaa olennaisesti ulkoilman entalpia. Ulkoilman entalpia 57 kJ/kg on tyypillisesti käytössä jäähdytysmitoitusten mitoittavana entalpiana Etelä-Suomessa. Simulointitapojen välillä on jopa yli 40% ero kokonaisjäähdytystehoissa. Pienin mahdollinen jäähdytysmitoitusteho saadaan simuloimalla ASHRAE:n mitoituspäivän ja

todenmukaisen käyttöprofiilin mukaan. Suurin mitoitusteho saadaan simuloimalla testisäädätällä ja käyttöasteen ollessa jatkuvasti 100%. Käyttöprofiilin huomioiminen näkyy selkeimmin tilajäähdytystehoissa, sillä tiloissa ei ole käytössä tarpeenmukaista ilmanvaihtoa (pois lukien yksittäiset toimistotilojen neuvotteluhuoneet.) Todenmukaisen käyttöprofiili on pienentänyt tilajäähdytyksen simuloitua jäähdytystehoa enimmillään neljänneksen. Laittevalmistajan koneajojen ja Sisäilmastoluokituksen mitoituspäivän mukaisesti simuloitujen jäähdytystehomitoitusten välillä ei havaita olennaista eroa. Jäähdytyksen osalta simulointitavalla on merkitystä erityisesti ilmanvaihdon jäähdytyksen mitoituksessa, mikäli ilmanvaihtoa ei ohjata esimerkiksi sisäilman lämpötilan mukaan. Ihmisten, laitteiston ja valaistuksen aiheuttamat lämpökuormat vaikuttavat suhteellisesti enemmän tilalämmityksen jäähdytystehontarpeeseen.

## 5.2 Tutkimustulosten lueteltavuus

Simulointimallit on laadittu mahdollisimman todenmukaista rakennuksen käyttöä jäljitellen. Tästä huolimatta rakennuksen käyttöä, ja esimerkiksi laitteiston tuottamia lämpökuormia ei olla voitu määrittellä absoluuttisen todenmukaisiksi ja tietoa rakennuksen todellisesta käytöstä ei ole. Alkuperäisten suunnitelmien lisäksi valaistuksen, laitteiden ja ihmisten vaikutusta on arvioitu Sisäilmastoluokituksen 2018 ja Ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisien arvojen mukaan, ei tiloissa olevien todellisten lämpökuormien mukaan.

Simuloinneissa ei olla huomioitu keittiöiden ja ravintolatilojen lämpökuormia, jotka on hallinnoitu omin erillisin järjestelmin ja erillispoistoin, eikä simulointituloksissa oteta näihin erikoisjärjestelmiin kantaa. Esimerkiksi valmistuskeittiön ilmanvaihdolla voi silti olla suuri osa kokonaislämmitystehosta. Simulointimallissa ei olla otettu huomioon mahdollisia muita epäpuhtauskuormia, jotka voivat nostaa vaadittavia ilmamääriä sisäilman laadun varmistamiseksi. Kuten Ympäristöministeriön oppaassa ilmanvaihdon suunnittelussa muissa kuin asuinrakennuksissa, liike- ja myymälätilojen mitoitettava ulkoilmavirta riippuu epäpuhtauskuomien vaikutuksesta. Tulosten yleistettävyyden kannalta liikerakennukset voivat olla hyvin erilaisia, kuten esimerkiksi tutkittu liikerakennus on melkein täysin ilmalämmitteinen hiilidioksidiohjauksella toimivien palautusilmakoneiden turvin. Myymälätiloissa on

tyypillisesti myös kylmätiloja, jotka on tästä työstä täysin rajattu pois. Kylmäkoneiden hukkalämpö voi mahdollisesti silti vaikuttaa tarvittavaan kokonaislämpötehoon.

Ilmanvaihtokoneiden limitykset ovat melko iso osa ilmanvaihtokoneiden kokonaislämmitystehosta, ja limityksillä on olennainen rooli ilmanvaihtokoneen toiminnassa huurtumistilanteessa. Simuloinneissa on huomioitu koneajojen mukainen lämmöntalteenottopatterin tuloilman lämpötilasuhde, ja IDA ICE:ssa on huomioitu laitevalmistajien koneajojen mukaiset jäteilman minimilämpötilat. Simulointiohjelma osaa tällöin rajoittaa lämmöntalteenoton hyötysuhdetta, jottei asetettua minimilämpötilaa aliteta. Ilmanvaihtokoneiden mahdollisia sulatustoimintoja ei kuitenkaan ole huomioitu simuloinneissa. Toisinaan laitevalmistajien koneajoissa ei ole kerrottu erikseen jäteilman minimilämpötilaa huurtumistilanteessa, jolloin hetkellisesti hyötysuhde voi olla huomattavasti matalampi riippuen ilmanvaihtokoneen sulatustoiminnosta.

Jäähdytyksessä energiasimulointiin vaikuttaa olennaisimmin ulkoilman entalpia, ja käyttöprofiilin huomioiminen vähentää jäähdytystehontarvetta tilajäähdytyksen osalta. Lämmöntalteenoton kosteudensiirtoa ja tuloilman suhteellista kosteutta ei ole tutkittu simuloinneissa, eikä vallitsevia sisäilmaolosuhteita ole huomioitu olosuhdesimuloinnin tarkkuudella. Jäähdytysjärjestelmissä, joissa vaaditaan tuloilman sekä sisäilmasto-olosuhteiden vuoksi tiettyä suhteellista kosteutta kesällä, voi vaatia suuremman jäähdytystehon korkeamman kuivatus-tehon vuoksi. Tutkittavassa kohteessamme ei ilmanvaihtojärjestelmää ohjata tarpeenmukaisesti, jolloin muuttuvat sisäilmasto-olosuhteet eivät vaikuta juurikaan ilmanvaihdon jäähdytystehontarpeeseen. Sen sijaan sisäisiin tilajäähdytyksen teho reagoi muuttuviin sisäisiin lämpökuormiin. Mitoitustilanteissa yön minimilämpötila on pidetty vakiona 15 °C, ja tämän muutoksen vaikutukseen ei ole simuloinneissa otettu kantaa. Tällä voi olla silti olennainen vaikutus yötuuletuksen tehokkuuteen. Esimerkiksi kovalla helteellä voi olla mahdollista, että lämpötila ei laske öisin alle 20 °C.

## **6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET**

Tutkimuksen tavoitteena on löytää rakennuksen energiajärjestelmien simulointiparametreja, joilla on olennainen vaikutus lämmityksen ja jäähdytyksen kokonaismitoitustehoon sekä

parantaa simulointien avulla mitoitustarkkuutta. Simulointipohjaisessa mitoitusmenetelmässä katetaan koko rakennuksen lämmitys- ja jäähdytystarpeet ja tutkitaan, kuinka paljon uskalletaan arvioida parametrien vaikutusta simulointimallien luetettavuuden turvin. Simulointipohjaisesti tehtävä energijärjestelmien tehomitoituksen avulla voidaan pienentää mitoitustehoa verrattuna perinteiseen mitoitukseen, mutta se on tehtävä aina tapauskohtaisesti huomioiden rakennuksen käyttö, geometria, sisäilmasto-olosuhdevaatimukset, ja laitevalinnat. Menetelmä hyödyntää perinteistä mitoitusta käyttöveden sekä oviverhokoneiden mitoituksen osalta. Pienin mahdollinen simuloitu mitoitusteho ei ole sellaisenaan realistinen tuotantolaitteiden mitoitusteho, vaan tällöin on aina tapauskohtaisesti huomioitava tietynlaisia varmuuskertoimia. Esimerkiksi mahdolliset kosteus-, ja epäpuhtauskuormat voivat vaikuttaa oleellisesti mitoitustehoon kasvattavasti.

Oviverhokoneiden osuus kokonaislämmitystehosta on merkittävä esimerkiksi liikerakennuksissa. Yhdenaikaisuudella saadaan merkittäviä säästöjä kokonaislämmitystehoon. Oviverhokoneiden yhdenaikaisuuden arvioinnissa on huomioitavaa rakennuksen käyttö tapauskohtaisesti. Esimerkiksi opetustiinteistöissä voi olla teoriassa todennäköisempää, että kaikki ovet ovat käytössä yhdenaikaisesti välitunnin jälkeen, kun oppilaat siirtyvät ulkoa opetustiloihin sekä koulun alkaessa. Liikerakennuksissa on mahdollista, että jokaisessa myymälätilassa on oma sisäänkäynti oviverhokonein. Tällöin voi olla perusteltua olettaa, ettei kaikki ovet ole aktiivisessa käytössä yhdenaikaisesti. Oviverhokoneet ovat tyypillisesti osana patteri- tai lattialämmitysverkoston, joka ei reagoi kovin nopeasti tehonmuutoksiin. Tällöin hetkelliset lämmitystehopiikit lämmitysverkostossa eivät vaikuta sisäilmaston olosuhteisiin.

Ilmanvaihdon lämmitystehon osalta isossa roolissa ovat palautusilman käyttö, ilmalämmitteisten tilojen todellinen lämmöntarve sekä ilmanvaihtokoneiden pattereiden limitykset. Tilalämmitys laskee melko lineaarisesti lämpökuormien sekä dynaaminen testisäädädata huomioiden. Tilalämmityksen osuus kokonaislämmitystehoista on tavallisesti uudisrakennuksissa melko pieni. Ilmamääräsäätöisissä tiloissa tilalämmityksen säästöpotentiaali on suurempi kuin ilmanvaihdon, sillä ihmisten hiilidioksidintuotto lisää ilmanvaihdon tarvetta.

Jäähdytyksen mitoitustehon osalta on oleellisinta kiinnittää huomiota mitoittavaan ulkoilman entalpiaan. Jäähdytyksen simuloinneissa olosuhteet ovat aina dynaamiset, jolloin



muutos tapahtuu ainoastaan olosuhteissa. Tilalaitteiden osalta myös yhdenaikaisuus tulee simuloinneissa huomioitua auringon paistaessa vain yhdestä suunnasta kerrallaan. Pieniä eroavaisuuksia jäähdytystehoihin voivat aiheuttaa simuloinnin ottaessa huomioon lämmöntalteenoton kosteuden ja lämmönsiirron. Jäähdytysjärjestelmien osalta mielenkiintoista olisi tutkia tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän jäähdytystehon muutoksia huomioidessa erityyppiset simulointitavat sekä sisäisten lämpökuormien vaikutus sekä yötuuletuksen vaikutusta mitoittavaan jäähdytystehoon.

Energiasimulointien lämmitys- ja jäähdytystehomitoituksen optimoinnin päämääränä on turhien varmuuksien ja mahdollisen ylimitoituksen poistaminen, huomioiden simulointiohjelmiston luotettavuus. Ylimitoitusta vältettäessä lämmitys- sekä jäähdytysjärjestelmä toimii paremmalla hyötysuhteella, jolloin voidaan vaikuttaa jo investointivaiheessa elinkaarikustannuksiin. Kaukolämpötoimisessa rakennuksessa tehomitoitus on kaukolämpöliittymän laskutusperuste, jolloin optimaalisella tehomitoituksella on konkreettista vaikutusta jo investointivaiheessa. Pienempi vesivirtamaksu mahdollistaa säästöt myös konkreettisesti vuositasolla.

Energiajärjestelmien säästöpotentiaalia arvioidessa on huomioitava ajantasaiset rakentamismääräykset käyttökohteen mukaan. Ympäristöministeriön asetukset uuden rakennuksen energiatehokkuudesta ohjaavat suunniteluun, jossa energiatehokkuusparannuksia ei toteuteta tinkimällä sisäilmasto-olosuhteista. Energiajärjestelmien mitoittava huipputeho voi olla hyvin hetkellinen, ja tästä näkökulmasta voi olla järkevää arvioida mikä on tämän tehopiikin hinta. Onko tilanteita, joissa voitaisiin tietoisesti tinkiä sisäilmaolosuhteista hetkellisesti? Pienellä joustolla olosuhteista voi olla mitoitustehon kannalta olennainen vaikutus. Potentiaalisia jatkotutkimusaiheita olisi myös verrata keskenään perinteisiä energiajärjestelmien tehomitoituksia, simulointituloksia sekä rakennuksen todellisia kulutuslukemia ja mitoitustehoja. Ilmatieteenlaitoksen on tarkoitus vuonna 2021 julkaista uusia rakennussäätietoaineistoja, joiden avulla voidaan arvioida rakennuksen tehontarvetta tarkemmin sekä luotettavammin.

## LÄHTEET

Airaksinen M. ja Jalas M., 2017. Energiamurroksen ennakoidut vaikutukset 2030: Rakennusten energiatehokkuus. Aalto-yliopisto, Johtamisen laitos. 12 s. ISBN: 978-952-60-7259-3.

Delzende, E., et al., 2020. Beyond Building Energy Simulation Tools. IOP Publishing, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 588. 4 s. doi:10.1088/1755-1315/588/2/022044.

Ciucci, Matteo, 2020. Faktoja Euroopan Unionista; Energiatehokkuus. Euroopan Parlamentti, Faktoja Euroopan Unionista – 2020. [verkkoaineisto]. [julkaistu 02/2020] [viitattu 2020-09-29]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/69/energiatehokkuus>

Crawley, B., et al, 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment 43. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.10.027

Egan, J. et al., 2018. Definition of a useful minimal-set of accurately-specified input data for Building Energy Performance Simulation. Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.012>

Equa, Ida Indoor Climate and Energy. [verkkoaineisto]. [julkaistu 2020] [viitattu 2021-24-02]. Saatavissa: <https://www.equa.se/fi/ida-ice>

Euroopan parlamentti. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen: kansalliset tavoitteet vuodeksi 2030. [verkkoaineisto]. [julkaistu 03/2018] [päivitetty 10/2018] [viitattu 2021-24-02]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180208STO97442/kasvihuonekaasupaastojen-vahentaminen>.

Energiatehokas koti, talotekniikan suunnittelu. [verkkoaineisto]. [päivitetty 07/2020] [viitattu 2021-24-02]. Saatavissa: [https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnittelu/lammitys](https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/lammitys).

Energiatoteellisuus, 2013. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2013.

Heiskanen, E., Lovio, R., Louhija, K., 2014. Miten uusi teknologia tulee uskottavaksi: esimerkinä maalämpö Suomessa. LTA 4/14. 21 s.

Heimonen, I., et al., 2007. Talotekniikan Elinkaarikustannukset. Espoo, VTT tiedotteita 2409.

Hutila, A., et al., 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Ilmatieteenlaitos. 110 s. ISBN: 978-951-697-756-3

Li, N., Yang, Z., et al., 2015. Why is the reliability of building simulation limited as a tool for evaluating energy conservation measures? <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.001>

LVI 34-10203, 1992. Rakennuksen jäähdytystarpeen määrittäminen. Rakennustietosäätiö ja LVI-keskusliitto. 4 s.

Motiva, Energian loppukäyttö. [verkkoaineisto]. [päivitetty 21/09/2020] [viitattu 2020-09-30]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/rakentaminen\\_ja\\_rakennukset#:~:text=Rakentamisella%20on%20keskeinen%20merkitys%20energian%20käytön%20aiheuttaa%20noin%2030%20prosenttia%20kasvihuonekaasun%20käytön%20vähentämistä](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset#:~:text=Rakentamisella%20on%20keskeinen%20merkitys%20energian%20käytön%20aiheuttaa%20noin%2030%20prosenttia%20kasvihuonekaasun%20käytön%20vähentämistä).

Motiva, Maalämpöpumppu, MLP [verkkoaineisto]. [päivitetty 11/11/2020] [viitattu 2021-04-24]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitusjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu\\_mlp](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitusjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu_mlp)

RT 07-11299, 2018. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Sisäilmayhdistys ry, Rakennustietosäätiö RTS ry, Suomen Arkkitehtiliitto SAFA ry, RAKLI ry, SKOL ry. Espoo. s. 24.

RT RakMK-103174, 2017. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ohjeet 2018. Ympäristöministeriö. 37 s.

Reinikainen, E., Loisa, L., Tyni, A., 2015. Lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla. FinZEB-hanke. Ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus ET ry, Talotekniikkateollisuus ry. 26 s.

FINVAC ry, 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Ympäristöministeriö. 25 sivua.

Sirén K., 2015. Rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergiatarpeen laskenta yksinkertaisella tuntitason mallilla. Aalto Yliopisto. 17 s.

Suomen virallinen tilasto (SVT). Asuinrakennusten päälämmönlähteiden kehitys 2010-luvulla. [verkkoaineisto]. [julkaistu 13/11/2020] [viitattu 2021-02-24].  
[http://www.stat.fi/til/asen/2018/asen\\_2018\\_2019-11-21\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_kat_001_fi.html).

Vinha, J., Laukkarinen A., Kaasanen T., 2019. Tutkimusraportti 168. Comprehensive development of nearly zero-energy municipal service buildings (COMBI). Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan laboratorio. 45 s. ISBN 978-952-15-4305-0.

Ympäristöministeriö, 2017a. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Energiatohokkuus. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ympäristöministeriö. 79 s.

Ympäristöministeriö, 2017b. 1048/2017 liite 1. Laskennallisen energiatohokkuuden vertailuvun (E-luvun) määrittäminen energiatodistuksessa. Oikeusministeriö. 42 s. ISSN 1455-8904

Ympäristöministeriö, 2017c. Tasauslaskentaopas 2018. Rakennuksen lämpöhäviön määrystenmukaisuuden osoittaminen.

Ympäristöministeriö, 2019. Taloudellisten kannusteiden käyttö vähähiilisen rakentamisen ohjauksessa. TALO-hankkeen loppuraportti. Helsinki. Ympäristöministeriö. 83 s. ISBN: 978-952-361-039-2.

Valtioneuvosto, Uudet säätietoaineistot tukevat kestävien rakennusten suunnittelua muuttuvassa ilmastossa. [verkkoaineisto]. [julkaistu 13/11/2020] [viitattu 2021-02-24]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/uudet-saatietaoaineistot-tukevat-kestavien-rakennusten-suunnittelua-muuttuvassa-ilmastossa>

1009/2017. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

1010/2017. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta.

### **Haastattelu**

Hilpinen, J. 2021. M.Sc. (Tech.) Energia-asiantuntija. Sweco Talotekniikka Oy. Helsinki, 00240, Ilmalanportti 2, Suomi. Haastattelu 22.01.2021.

**Taulukko.** Lämpöolosuhteiden tavoitearvot (Sisäilmastoluokitus 2018, 6).

<b>Operatiivisen lämpötilan tavoitearvot eri sisäilmastoluokissa.</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
<b>Operatiivinen lämpötila top [°C]</b>			
tu ≤ 0 °C	21,5	21,5	
0 < tu ≤ 20 °C	21,5 + 0,15 x tu 1)	21,5 + 0,15 x tu 1)	
tu > 20 °C	24,5	25,5	
<b>Lämpötilan sallittu vaihteluväli [°C] poikkeama ylöspäin</b>			
tu ≤ 0 °C	< 22,5	< 23	
0 < tu ≤ 15 °C	< 22,5 + 0,166 × tu	< 23 + 0,2 × tu	
tu > 15 °C < 25 < 26	< 25	< 26	
<b>Lämpötilan sallittu vaihteluväli [°C] poikkeama alaspäin</b>			
tu ≤ 0 °C	> 20,5	> 20,5	
0 < tu ≤ 20 °C	> 20,5 + 0,075 × tu	> 20,5 + 0,025 × tu	
tu > 20 °C	> 22	> 21	
<b>Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo [°C]</b>			
tu ≤ 0 °C	< 23	< 23	
0 < tu ≤ 20 °C <	23 + 0,2 × tu	< 23 + 0,2 × tu	
tu > 15 °C	< 27	< 27	
tu ≤ 10 °C			< 25 (26) 2)
tu > 10 °C			< 27 (32) 2)
<b>Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo [°C]</b>	> 20	> 20	> 20 (18) 2)
<b>Olosuhteiden pysyvyys [% käyttöajasta]</b>			
<b>toimi- ja opetustilat</b>	90 %	90 %	
<b>asunnot</b>	90 %	80 %	

1) S1-luokassa operatiivisen lämpötilan on oltava tila/huoneistokohtaisesti aseteltavissa välillä top ±1,5 °C. Jos samassa huoneessa on useita henkilöitä, käytetään lämpötilan tavoitetasona taulukossa esitettyjä tavoitearvoja.

2) Suluissa asumisterveysasetuksen mukaiset toimenpiderajat.